



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JARI PURANEN MAALÄMPÖKENTÄN SIMULOINTI

Diplomityö

Tarkastaja: Dosentti Hannu Ahlstedt
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunnan tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa 9.3.2016

TIIVISTELMÄ

JARI PURANEN: Maalämpökentän simulointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 53 sivua

Kesäkuu 2016

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Energiatehokkuus

Työn tarkastaja: Dosentti Hannu Ahlstedt

Avainsanat: COMSOL Multiphysics, simulointi, lämpökaivo

Rakennusten energiatehokkuutta ohjataan usealla direktiivillä ja standardilla. Tavoitteena on lähitulevaisuudessa päästä uusien rakennusten osalta lähes tai nettollaenergiaan. Energiatehokkuusvaatimusten täyttämisen yhtenä osana ovat lämpöpumput, joilla voidaan merkittävästi vähentää ostoenergian määrää rakennuksissa ja pienentää lämmityksen tuottamia päästöjä. Maalämpöpumppuja on kaikista lämpöpumpuista vielä pieni osa, mutta niidenkin määrä kasvaa lämpöpumppujen kokonaismäärän lisääntyessä.

Maalämpökaivojen ja lämpökaivokenttien oikea mitoitus on keskeinen tekijä järjestelmän pitkän eliniän takaamiseksi. Kaivojen alimitoittaminen voi johtaa lämpökaivojen jäätymiseen ja kalliiseen korjausprosessiin. Vastaavasti ylimitoittaminen aiheuttaa ylimääräisiä rakennuskustannuksia. Mitoitus on perustunut kokemusperäiseen tietoon ja analyttisiin simulointimalleihin, joissa kaivoa useimmiten käsitellään viivamaisena lämpönieluna.

Tässä diplomityössä on simuloitu COMSOL Multiphysics -ohjelmalla kahden vierekkäisen lämpökaivon lämmönsiirtonesteen lämpötilan ja lämpötehon tuoton riippuvuutta kaivojen välisestä etäisyydestä. Työn pääpaino on ohjelman ominaisuuksiin perehtyminen, eikä työssä pyritä ratkaisemaan kaikkia lämpökaivojen mitoituksen haasteita. Simulaatioissa on otettu huomioon lämmönsiirtonesteen liikkuminen ja U-putken muoto. Lisäksi työssä on tarkasteltu pohjaveden virtauksen vaikutusta kaivojen ympäristön lämpötilajakaumaan. Simulaatioissa on tarkasteltu yhden ja 10 vuoden aikajaksoja, joiden perusteella voidaan todeta kaivojen välisellä etäisyydellä olevan pitkällä aikavälillä suuri vaikutus lämmönsiirtonesteen keskilämpötilaan ja sitä kautta tuotettuun lämpötehoon. Pohjaveden virtausnopeudella voi tietyissä kallioperän olosuhteissa olla merkittävä vaikutus kaivojen lämpötehoon.

ABSTRACT

JARI PURANEN: Simulation of Borehole Heat Exchanger Field

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 53 pages

May 2016

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

Major: Energy Performance

Examiner: Adjunct Professor Hannu Ahlstedt

Keywords: COMSOL Multiphysics, simulation, borehole

Buildings are responsible for 40 % of energy consumption in the EU. Energy performance of buildings is regulated by both EU-wide and local legislation. The EU has set a target for all new buildings to be nearly or net zero-energy in the near future. One part of fulfilling these energy efficiency requirements are heat pumps. The number of installed ground source heat pumps is growing with the total number of heat pump units.

The correct dimensioning of borehole heat exchanger fields is essential in ensuring a long lifetime for these systems. If the boreholes are made too shallow or too near each other, there is a risk of freezing the borehole which leads to expensive repairs. Drilling the boreholes too deep can be equally expensive. Borehole design has been based either on experimental knowledge or simplified analytical models where the borehole is considered to be a line source heat sink.

In this thesis COMSOL Multiphysics software is used to simulate the temperature of the circulating heat transfer fluid in two boreholes close to each other. The main focus of the thesis is getting acquainted with different features of the software and their applicability to borehole heat exchanger field simulations. Intent of this thesis is not to give out all possible answers for every possible problem regarding borehole dimensioning. The shape of the U-pipe and the flow of the heat transfer liquid is taken into consideration. In addition the groundwater flow and its effect on the temperature field of the ground is simulated. Simulations for 1 and 10 year duration demonstrate that the distance of the boreholes has a great effect on the temperature of the heat transfer liquid and therefore to the transferred thermal power in the long time scales. Similarly, the groundwater flow rate can have an effect on the borehole thermal power but only in specific situations.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö ja koko diplomi-insinöörin tutkinto on tehty kokoaikaisen päivätyön ohessa hieman pakkomielteisenä harrastusprojektina. Tästä syystä en ole pystynyt käyttämään diplomityöhön aivan niin paljon aikaa, kuin olisin halunnut. Pidän kuitenkin oman osaamiseni kehittymisen kannalta työtä erittäin onnistuneena.

Suuret kiitokset työn tarkastajalle ja ohjaajalle dosentti Hannu Ahlstedtille mielenkiintoisesta ja omaan elämäntilanteeseeni sopivasta aiheesta, joka hiljalleen muovautui lopulliseen muotoonsa. Sain tehdä työtä omaa tahtiani, mutta tarvittaessa sain aina hyviä vinkkejä työn eteenpäin viemiseksi. Hannun lisäksi haluan kiittää myös muita energiatekniikan opintojaksojen vetäjiä, jotka ovat hyvällä opetuksellaan pitäneet yllä ja kasvattaneet mielenkiintoani lämpötekniikkaa kohtaan. Kiitokset kuuluvat myös COMSOLin Suomen toimiston Timo Karviselle, joka oli korvaamaton apu COMSOLin ja Pipe Flow -moduulin kanssa.

Tampereella 24. toukokuuta 2016.

Jari Puranen
jpuranen@gmail.com

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Maalämpö ja lämpöpumput	3
2.1 Lämpökaivo	3
2.2 Terminen vastetestti eli TRT-mittaus	7
2.3 Maalämpöpumpun toimintaperiaate	8
3. Lämmönsiirto lämpökaivossa	9
3.1 Lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt maassa	9
3.2 Lämmönsiirto U-putkessa	10
3.2.1 Lämmönsiirtokertoimien määrittäminen	13
3.2.2 Sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin	13
3.2.3 Ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin	14
3.3 Pohjavesivirtaus ja Darcyn laki	15
3.4 Pohjaveden vaikutus lämmönsiirtoon	16
4. COMSOL Multiphysics	18
4.1 Mallipuun käyttäminen	18
4.2 Geometrian luonti	20
4.3 Materiaalit	23
4.4 Laskentamoduulit	23
4.5 Laskentaverkko	27
4.6 Ratkaisija	28
4.7 Jälkikäsittely	29
5. Mallinnustulokset	31
5.1 Lämmönsiirtonesteen lämpötila	32
5.2 Lämpökaivon tuottama teho	33
5.3 Lämmönsiirtokerroin	38

5.4	Pohjavesivirtauksen vaikutus	41
5.5	Muita näkökulmia mallinnukseen	42
6.	Yhteenveto	47
6.1	Pohdinta	48
6.2	Työn kehittäminen	49
	Lähteet	51

KUVALUETTELO

2.1	Kallioon porattavan lämpökaivon periaatekuva.	4
2.2	Maalämpöpumppujärjestelmän periaatekuva.	8
4.1	COMSOLin mallipuu.	19
4.2	Geometrian luonti Extrude- ja Array-toiminnoilla.	21
4.3	Geometria kahdelle lämpökaivolle. Kaivojen etäisyys on 10 m.	21
4.4	Putken geometrian luonti Pipe Flow -moduulia varten.	22
4.5	Aineominaisuuden luonti olomuodon muutosta varten paloittain määriteltynä.	24
4.6	Aineominaisuuden luonti olomuodon muutosta varten pisteittäin määriteltynä. Sulamislämpö on otettu huomioon ominaislämpökapasiteetissa piikkinä sulamislämpötilan kohdalla.	24
4.7	Malliin valitut fysiikat, jotka ovat kuvan tapauksessa lämmönsiirto kiinteässä aineessa ja Pipe Flow.	25
4.8	Laskentaverkko 100 metriä syville ja 10 metrin etäisyydellä oleville lämpökaivoille.	27
4.9	Kahden kaivon systeemin ($L = 20$ m) lämpötilajakauma 10 vuoden simuloinnin jälkeen. Lämpötilan yksikkö on kelvin.	29
5.1	Lämmönsiirtonesteen lämpötila kaivon syvyyden funktiona 100 m kaivolle yhden vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyydet vasemmalta oikealla 10, 15 ja 20 m.	33
5.2	Lämmönsiirtonesteen lämpötila syvyyden funktiona 150 m kaivolle yhden vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyydet vasemmalta oikealla 10, 15 ja 20 m.	34

5.3	Lämmönsiirtonesteen lämpötila kaivon syvyyden funktiona 100 m kaivolle 10 vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyydet vasemmalta oikealla 10, 15 ja 20 m.	34
5.4	Lämmönsiirtonesteen lämpötilajakaumat yhden ja 10 vuoden jälkeen 100 m kaivoparissa 10 m etäisyydellä.	35
5.5	Lämmönsiirtonesteen lämpötila kaivon syvyyden funktiona 140 m kaivolle 10 vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyys on 10 m.	35
5.6	Lämpökaivoparin (syvyys 100 m) yhden kaivon tuottama teho ensimmäisen vuoden aikana eri kaivojen etäisyyksillä.	36
5.7	Lämpökaivoparin (syvyys 150 m) yhden kaivon tuottama teho ensimmäisen vuoden aikana eri kaivojen etäisyyksillä.	37
5.8	Lämpökaivoparin (syvyys 140 m) yhden kaivon tuottama teho 10 vuoden aikana kahdella eri etäisyydellä.	38
5.9	Lämmönsiirtonesteen ulostulolämpötila ja yhden kaivon teho 100 m syville kaivoille 10 m etäisyydellä ensimmäisen kuuden vuoden aikana.	39
5.10	Vedenläpäisevyys $3 \cdot 10^{-4}$ m/s ja hydraulinen gradientti 0,00125, $Pe \approx 26$	42
5.11	Vedenläpäisevyys $3 \cdot 10^{-8}$ m/s ja hydraulinen gradientti 0,00125, $Pe \approx 0,0026$	43
5.12	Vedenläpäisevyys $3 \cdot 10^{-4}$ m/s ja hydraulinen gradientti 0,0125, $Pe \approx 260$	43
5.13	Lämpökaivoparin yhden kaivon teho 100 m syvälle kaivolle 10 m etäisyydellä, kun lämpötilagradientti maaperässä otetaan huomioon.	45
5.14	Maaperän lämpötila 100 m syvälle kaivoparille 20 metrin etäisyydellä 10 vuoden jälkeen. Kaivot ovat sylinterinieluja.	45

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a	U-putken haarojen välisen etäisyyden puolikas [m]
A	Poikkipinta-ala [m ²]
c_p	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
$c_{p,L}$	Nestefaasin ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
$c_{p,P}$	Kiinteän aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
$c_{p,v}$	Veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
d	Putken halkaisija [m]
d_h	Hydraulinen halkaisija [m]
dh/dx	Vaakasuuntainen hydraulinen gradientti [m/m]
f_D	Kitkakerroin [-]
g	Putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s ²]
h	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m ² K)]
h_s	Lämmönsiirtokerroin putken sisäpinnalla [W/(m ² K)]
h_u	Lämmönsiirtokerroin putken ulkopinnalla [W/(m ² K)]
H	Lämpökaivon syvyys [m]
k	Lämmönjohtavuus [W/(mK)]
k_L	Nesteen lämmönjohtavuus [W/(mK)]
K	Vedenläpäisevyys [m/s]
L	Lämpökaivojen välinen etäisyys [m]
L_k	Karakteristinen mitta [m]
\dot{m}	Massavirta [kg/s]
Nu	Nusseltin luku [-]
Pe	Péclet'n luku [-]
Pr	Prandtlin luku [-]
q	Lämpövirran tiheys pituusyksikköä kohti [W/m]
q''	Lämpövirran tiheys pinta-alayksikköä kohti [W/m ²]
\mathbf{q}	Lämpövirran tiheys vektorimuodossa [W/m ²]
\mathbf{q}_L	Lämpövirran tiheys nestefaasissa [W/m ²]
\mathbf{q}_P	Lämpövirran tiheys kiinteässä aineessa [W/m ²]
q_V	Darcyn virtausnopeus [m/s]
Q	Lämpöteho pituusyksikköä kohti [W/m]
Q_{wall}	Putken seinämän lämpöteho [W/m]
Q'''	Lämpöteho tilavuusyksikköä kohti [W/m ³]

r	Putken säde [m]
r_s	Putken sisäsäde [m]
r_u	Putken ulkosäde [m]
Ra	Rayleighin luku [-]
Re	Reynoldsin luku [-]
t	Aika [s]
T	Lämpötila [K]
T_{ext}	Ympäristön lämpötila [K]
T_{kaivo}	Lämpökaivon sisäseinän lämpötila [K]
T_{neste}	Lämmönsiirtonesteen keskimääräinen lämpötila [K]
T_L	Nestefaasin lämpötila [K]
T_P	Kiinteän aineen lämpötila [K]
T_s	Lämpötila U-putken sisäpinnassa [K]
T_u	Lämpötila U-putken ulkopinnassa [K]
T_{sis}	Lämpötila U-putken sisäänmenossa [K]
T_{ulos}	Lämpötila U-putken ulostulossa [K]
u	Keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
\mathbf{u}	Nopeusvektori [m/s]
U	Lämmönläpäisykerroin [W/(m ² K)]
v	Pohjaveden keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
\dot{V}	Tilavuusvirta [m ³ /s tai dm ³ /s]
z	Korkeusasema [m]
Z	Putken perimetri [m]
α	Terminen diffusiviteetti [m ² /s]
β	Tilavuuden lämpötilakerroin [1/K]
Δp	Paine-ero [Pa]
ΔL	Putken osan pituus [m]
ΔT	Lämpötilan muutos [K]
Δx	Vaakasuora etäisyys [m]
ϵ	Putken pinnan karheus [m]
Θ_L	Nestefaasin tilavuusosuus, huokoisuus [-]
Θ_P	Kiinteän aineen tilavuusosuus [-]
κ	Permeabiliteetti [m ²]
μ	Dynaaminen viskositeetti [Pa·s]
ν	Kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]
ρ	Tiheys [kg/m ³]
ρ_L	Nestefaasin tiheys [kg/m ³]

ρ_P	Kiinteän aineen tiheys [kg/m ³]
ρ_v	Veden tiheys [kg/m ³]
Φ	Lämpöteho [W]

1. JOHDANTO

Lämpöpumppujen käyttö asuinrakennusten lämmityksessä ja jäähdytyksessä on edelleen kasvussa. Euroopan Unionin parlamentin ja neuvoston RES-direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä tarkoittaa Suomessa muun muassa lämpöpumpuilla tuotetun energiamäärän kasvattamista noin 8 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä [1]. Lämpöpumpuilla voidaan hyödyntää maahan, kallioon, ilmaan tai veteen varastoitunutta lämpöenergiaa. Vuonna 2014 Suomessa lämmitykseen käytetystä 56 TWh:sta arvioidaan noin 5 TWh:a saadun lämpöpumpuilla, josta maalämpöpumppujen osuus on noin 2,2 TWh:a. Vuonna 2015 Suomessa myytiin yhteensä 60 000 lämpöpumppua, joista maalämpöpumppuja oli 9000. Maalämpöjärjestelmien käyttö on lyhyen aikavälin tarkastelulla hienoisessa laskussa, mutta kuitenkin pitemmällä aikajaksolla trendi on kasvava. [2], [3]

Lämpöpumppujen lisäksi myös suuren kokoluokan järjestelmiä maassa olevan lämmön hyödyntämiseksi kehitetään. Tämän työn kirjoittamisen hetkellä St1 ja Fortum tekevät yhteistyössä kokeellista geotermistä lämpölaitosta St1 Deep Heat, jonka syvyys tulee arvioiden mukaan olemaan noin 7 km. [4]

Maalämpöä hyödyntävissä laitoksissa siirretään maaperän lämpöenergiaa johonkin lämmönsiirtonesteeseen. Järjestelmien mitoituksessa olennainen suure on maaperän tehollinen lämmönjohtavuus, joka riippuu maa- tai kivilajin lisäksi esimerkiksi pohjaveden vaikutuksesta. Lämmönjohtavuus voi vaihdella merkittävästi, joten se on syytä selvittää huolellisesti. Mitoituksessa on myös otettava huomioon vierekkäisten lämpökaivojen vaikutus toisiinsa, koska lähekkäin olevat kaivot lisäävät kaivojen jäätymisriskiä alimitoitetuissa lämpökaivoissa. [5]

Edellä mainituista seikoista nähdään, että maalämpökenttien simulointi on ajankohtainen ja kiinnostava tutkimusaihe. Maalämpöjärjestelmien käyttöikä on kymmeniä vuosia, jolloin mitoituksessa tulisi pystyä riittävän hyvin ennustamaan laitteiston toimintaa riittävän pitkällä aikavälillä. Ennustamisesta tekee hankalan vaihtelevat aineominaisuudet ja muut olosuhteet. Huonolla mitoituksella lämpöpumpun säh-

könkulutus voi olla merkittävästi laskettua suurempi, jolloin pumpun lämpökerroin ja sitä kautta saatu säästö on ennustettua pienempi. Pieleen menneen mitoituksen perusteella kaivo saattaa jopa jäätä kokonaan.

Tässä diplomityössä perehdytään COMSOL Multiphysics -ohjelmiston version 5.2. (jatkossa COMSOL) ominaisuuksiin maalämpökentän simuloinnissa ja erityisesti sen Pipe Flow -moduuliin, jonka avulla on mahdollista lisätä simulointimalliin U-putkessa kiertävä lämmönsiirtoneste lämpökaivoon. Työn tavoitteena ei ole ratkaista kaikkia maalämpökenttien mitoituksen ongelmia ja haasteita, vaan tarkoitus on selvittää yhden ohjelmiston tuomia mahdollisuuksia simulointiin. Mallinnuksessa pyritään huomioimaan kaivojen syvyyden ja niiden välisen etäisyyden vaikutus kaivojen tuottamaan tehoon ja maaperän lämpötilakenttään. Lisäksi tarkastellaan pohjavesivirtauksen vaikutusta vierekkäisten kaivojen kytkeytymiseen. Tarkastelu rajoitetaan kahden kaivon järjestelmiin ja laskentaa tehdään pääasiassa vakioaineominaisuuksilla.

Pipe Flow -moduulin lisenssi oli käytössä vain rajallisen ajan tämän diplomityön tekemiseen varatun ajan loppupuolella, joten jokaista erilaista tilannetta ei tässä työssä ole ehditty laskea läpi, eikä aivan kaikkia kiinnostavia tuloksia ole saatu laskettua. Ohjelman tuomat mahdollisuudet maalämpökenttien simulointiin pyritään kuitenkin tuomaan esiin työn jatkokehittämistä varten.

2. MAALÄMPÖ JA LÄMPÖPUMPUT

Maalämmöllä tarkoitetaan pintamaahan ja kallioon varastoituneen energian käyttöä. Geotermisen, eli syvältä Maapallon sisältä tulevan lämmön, merkitys maalämpöpumpuissa on mitätön. Suomalaisen peruskallion lämmönjohtavuus k on suuruusluokkaa 2–4 W/mK [6] ja lämpötilan nousu mentäessä alaspäin maanpinnasta on suuruusluokkaa 1 °C/100 m. Näin ollen alhaalta ylöspäin siirtyvän lämpövirran tiheys q'' kallioperässä on Fourier'n johtumislain mukaan noin

$$q'' = k \cdot \frac{dT}{dz} = 3 \text{ W/mK} \cdot \frac{1 \text{ K}}{100 \text{ m}} = 0,03 \text{ W/m}^2. \quad (2.1)$$

Maalämpökaivojen energia on siis peräisen kaivoa ympäröivästä massasta ja lämpö siirtyy ympäristöstä johtumalla. [5] Viime kädessä maalämpöjärjestelmillä kerätään Auringosta peräisin olevaa energiaa.

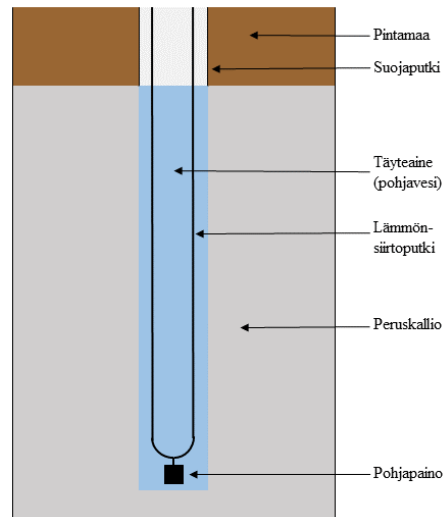
2.1 Lämpökaivo

Maalämpöpumppujärjestelmissä maassa kierrätetään lämmönsiirtonestettä, joka lämpenee putkiston läpi kulkiessaan. Tällä lämmöllä höyrystetään lämpöpumpun kylmäaine. Järjestelmän teho Φ on siis suoraan sidottu lämmönsiirtonesteen lämpötilan muutokseen $T_{\text{ulos}} - T_{\text{sis}}$ putken matkalla. Teho saadaan nesteen massavirran \dot{m} ja ominaislämpökapasiteetin c_p avulla kaavalla

$$\Phi = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{ulos}} - T_{\text{sis}}). \quad (2.2)$$

Tyypillinen massavirta nesteelle on yhdessä putkessa noin 0,6 kg/s ja lämmönsiirtonesteiden ominaislämpökapasiteetit ovat välillä 3–4 kJ/kgK [7]. Esimerkiksi kolmen asteen lämpötilan nousulla saadaan tehoksi

$$\Phi = 0,6 \text{ kg/s} \cdot 4 \text{ kJ/kgK} \cdot 3 \text{ K} = 7,2 \text{ kW}. \quad (2.3)$$



Kuva 2.1 Kallioon porattavan lämpökaivon periaatekuva.

Maalämpöä voidaan kerätä maan pintakerroksesta vaakaputkistolla, joka sijoitetaan 1-2 metriä maanpinnan alapuolelle. Tällainen putkisto vaatii kuitenkin suhteellisen suuren tontin. Lisäksi voidaan käyttää niin sanottuja energiapaaluja, joissa lämmönsiirtoneste kiertää rakennuksen maapaaluissa [1]. Tässä työssä käsitellään vain kallioon porattavia pystykaivoja. Porakaivon syvyys on tyypillisesti noin 200 m ja halkaisija välillä 115–165 mm [6]. Porakaivon tekeminen onnistuu vain jos peruskallio on riittävän lähellä maan pintaa [8]. Pohjoismaissa kaivon täyteaineena on yleensä pohjavesi, mutta muualla Euroopassa ja esimerkiksi Yhdysvalloissa on tapana täyttää reikä jollain kohtuullisesti lämpöä johtavalla materiaalilla kuten bentoniitilla, jonka lämmönjohtavuus on noin 2 W/mK [6], kun se on vedelle noin 0,6 W/mK. Pohjaveden pinnan tason yläpuolinen osa kaivosta on käytännössä tehotonta [9]. Suomessa bentoniitin käyttöä on tutkinut ainakin Geologian Tutkimuskeskus, mutta heidän mittauksessaan todettiin, ettei bentoniitti merkittävästi tuonut parannusta kaivon toimintaan [10]. Pinnalla olevan irtomaan matkalle kaivoon asennetaan suojaputki, jonka alareunaan laitetaan vedeneristys. Kaivon rakennetta on havainnollistettu kuvassa 2.1.

Kaivosta lämpö otetaan liuoskierrolla, jossa kaivoon sijoitetaan lämmönottoputki U-lenkin muotoon. Putken rakenne voi olla myös koaksiaalinen. Lämmönsiirtonesteinä voidaan käyttää esimerkiksi etanolin ($\approx 30\%$) tai etyleeniglykolin ($\approx 40\%$) vesiliuoksia. Lämmönsiirtonesteen putken materiaali on tyypillisesti polyeteeni ja putken ulkohalkaisija on noin 40 mm [6]. Samassa kaivossa voi olla kaksikin U-putkea. Putken haarojen sijainti kaivon seiniin ja toisiinsa nähden on merkittävä tekijä saatavas-

sa lämpötehossa. Tätä ovat mallintaneet ainakin Acuña ja Palm [11], joiden mukaan paras teho pohjavedellä täytetyssä kaivossa saavutetaan, kun putket ovat kiinni kaivon vastakkaisissa seinissä. Teho on pienin, kun putken haarat ovat kiinni toisissaan kaivon keskellä. Edellä viitatussa tutkimuksessa suurimman ja pienimmän tehon ero on noin 60 %:a. Nämä tulokset on helppo ymmärtää, koska vesi on huonompi lämmönjohde kuin kallio, ja toisaalta U-putken haarat pitäisi eristää toisistaan, koska paluuhaara on lämpimämpi kuin menohaara. Edellä mainitussa tutkimuksessa on oletettu lämmönsiirtokertoimet haaroissa vakioksi ja laskenta on tehty vain kaivon poikkileikkaukselle.

Todellisuudessa on vaikea täsmälleen tietää, miten putki kaivossa asettuu. Haarojen väliin voidaan asentaa erottimia, jotka pitävät haarat erillään. Tässä työssä U-putki on mallinnettu symmetrisesti kaivon keskelle niin, että haarojen ja kaivon seinän välissä on vettä. Tämä johtuu siitä, että käytetty COMSOLin Pipe Flow -laskentamoduuli olettaa, että putken ympärillä on joka puolella nestettä. Laskentamoduulia käsitellään tarkemmin COMSOL-laskentaa ja -malleja esittelevässä luvussa 4.

Lämpökaivosta saatava teho määräytyy kaivoa ympäröivän maan lämpötilan laskusta ja lämmönjohtumisesta ympäristöstä. Keskimääräinen lämpömäärä yhdestä kaivosta on Suomessa noin 100 kWh/m [9]. Lämpötilakenttä voi muuttua kaivon käytön aloittamisen jälkeen paikallisesti hyvinkin nopeasti, mutta jatkuvuustilan saavuttaminen kestää vuosikausia. Lämpötilan muutoksen nopeutta materiaalissa kuvaa terminen diffusiviteetti α [m²/s], jonka määritelmä on [13]

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}. \quad (2.4)$$

Suomen peruskalliossa α on suuruusluokkaa

$$\alpha = \frac{3 \text{ W/mK}}{2700 \text{ kg/m}^3 \cdot 900 \text{ J/kgK}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (2.5)$$

Pieni terminen diffusiviteetti tarkoittaa käytännössä sitä, että pitkällä aikavälillä lämmönsiirtonesteen keskilämpötila laskee alemmas kuin suurella diffusiviteetillä, koska kallio ei pysty luovuttamaan lämpöä niin nopeasti kuin sitä otetaan kaivon lähiympäristöstä.

Lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan 10-15 metrin syvyyteen asti, jossa läm-

pötila on paikkakunnan sijainnista riippuen Suomessa noin 4-8 °C. Tästä syvyydestä alaspäin lämpötila kasvaa noin 1 °C/100 m. Suurissa kohteissa kaivoja voi olla useita kymmeniä, jolloin puhutaan lämpökaivokentästä. Tällöin kaivojen välinen etäisyys vaikuttaa merkittävästi maaperän lämpötilajakaumaan ja sitä kautta kentästä saatavaan tehoon. [9] Esimerkiksi pientaloalueen lämmityksen kattavan maalämpökentän kaivot kannattaisi porata laajalle alueelle sen sijaan että ne porattaisiin keskitetysti vain tietylle alueelle.

Perustavan laatuinen ero pintamaasta ja porakaivosta lämpöä ottavien järjestelmien välillä on se, että pintamaassa olosuhteet palautuvat nopeasti ennalleen, mutta kallioperässä tapahtuu hidasta muutosta pitkällä aikavälillä. Lähekkäin olevien kaivojen välillä jäätymisvaara on suurin. Jäätymisriskin rajana pidetään lämmönsiirtonesteen keskilämpötilaa -2 °C. Kaivon jäätymisellä tarkoitetaan kaivossa olevan veden jäätymistä. Jäätymisen aiheuttama paine voi litistää keruuputken, jolloin pahimmassa tapauksessa joudutaan poraamaan uusi kaivo, koska aina vanhan keruuputken poistaminen ei ole mahdollista. [14]

Lämpökaivokenttä pitäisi saada mitoitettua oikein. Ylimitoitettu kaivo on tarpeetoman syvä tai kaivoja on ylimäärin tarvittavaan tehoon nähden, jolloin kentän rakennuskustannukset ovat suuret. Alimitoitetusta kaivosta otetaan energiaa enemmän kuin kallioperä pystyy jatkuvasti luovuttamaan, jolloin kallion lämpötila laskee liiaksi ja lämpöpumpun käyttöön tarvittava sähköenergian määrä kasvaa, jolloin laitteiston lämpökerroin huononee. Hyvässä tilanteessa kallio ehtii palautua esimerkiksi kesän aikana, kun lämmitysenergian tarve on pientä. Lämpökaivoa voidaan käyttää jäähdytykseen, jolloin ihannetilanteessa viilennyskauden aikana saadaan kallioon vietyä lämpöä yhtä paljon kuin siitä lämmityskauden aikana otetaan. Yksinkertaisena yhtälönä maaperän nettotase voidaan esittää muodossa

$$\Phi_{\text{netto}} = \Phi_{\text{otto}} - \Phi_{\text{anto}}. \quad (2.6)$$

Jos otto- ja antoteho eivät ole tasapainossa, pitää lämpökaivon vaikutuspiiriin saada riittävän suuri maamassa, jotta kaivosta saadaan mitoituksen mukainen teho [14].

Lämpökaivokenttien simulointia ja optimointia on tehty paljon, mutta käytännössä kaivo on yksinkertaistettu viiva- tai sylinterilähteeksi useimmissa julkaistuissa artikkeleissa tai opinnäytetöissä [11], [15], [16] ja [17]. COMSOLin vastaavuutta näihin malleihin vertaamalla ohjelman antamia tuloksia analyttisiin on niin ikään tarkasteltu esimerkiksi Van Reeven diplomityössä [18] ja Marcotten ja Pasquies'n artikkelissa.

lissa [19]. Nämä tarkastelut on siinä määrin hyvin dokumentoitu, ettei niitä tässä diplomityössä erikseen esitetä.

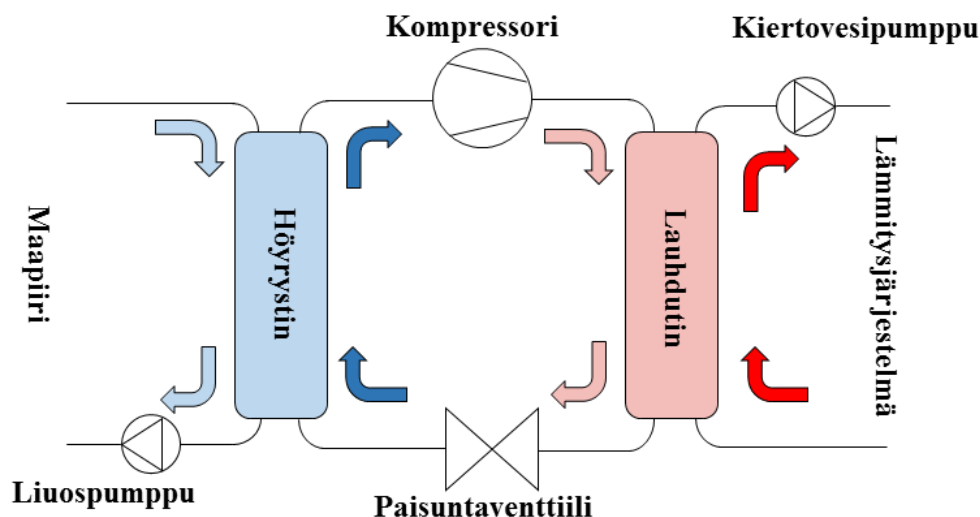
Samanaikaisesti ei ole mahdollista ratkaista numeerisesti sekä lämmönsiirtoa että virtausta lämmönsiirtonesteessä, mutta COMSOLilla on tehty lämmönsiirtoputken mallinnusta käyttäen lämmönsiirtokertoimelle vakioarvoa niin, että virtauskenttää ei ratkaista [20]. Lämmönsiirtonesteen lämpötilan täsmällinen laskeminen simulatioiden osana näyttää olevan suhteellisen vähän tutkittu aihe. Tässä työssä perusajatuksena on juurikin simuloida, miten paljon lämmönsiirtonesteen lämpötila muuttuu maapiirissä kiertäessään, kun useimmissa aiemmissa tutkimuksissa lähtökohtana on jokin tietty maasta otettu teho, jonka perusteella lasketaan lämmönsiirtonesteelle lämpötila. Lisäksi tässä työssä otetaan huomioon malleissa myös kaivossa oleva vesi, mikä useimmista malleista puuttuu.

2.2 Terminen vastetesti eli TRT-mittaus

Erilaisten kivilajien ja muiden maa-aineisten lämmönjohtavuuksia löytyy kirjallisuudesta, mutta lämpökaivon mitoituksen kannalta on hyvä tietää kohteen todellinen tehollinen lämmönjohtavuus. Tämä voidaan selvittää termisellä vastetestillä (Thermal Response Test), jossa lämmönkeruuputkiston, kaivon ja kallion muodostaman systeemin käyttäytymistä simuloidaan. Testissä porattuun kaivoon asennetaan putki, jossa kierrätetään kaivon ulkopuolella lämmitettyä lämmönsiirtonestettä, joka jäähtyy putken matkalla. Jäähtymisen perustella voidaan arvioida maaperän keskimääräistä lämmönjohtavuutta ja kaivon lämpövastusta. Lämpövastuksella tarkoitetaan lämmönsiirtonesteen ja porakaivon seinän välistä vastusta

$$R = \frac{T_{\text{kaivo}} - T_{\text{neste}}}{q}, \quad (2.7)$$

missä q on lämpövirran tiheys putken pituusyksikköä kohden. Tyypillinen lämpövastuksen arvo Rosén et al. mukaan yhden polyeteenistä valmistetun U-putken kaivossa on noin 0,10 mK/W, kun pohjavesi on sulaa ja noin 0,06 mK/W jäätyneelle kaivolle, kun putken haarat ovat mahdollisimman kaukana toisistaan [21]. Varsinaisia lämmönsiirtoa hallitsevia yhtälöitä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.



Kuva 2.2 Maalämpöpumpputilajärjestelmän periaatekuva.

2.3 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Maalämpöjärjestelmien osana on käytännössä aina lämpöpumppu, jolla maasta pienellä lämpötilaerolla saatu lämpö voidaan siirtää esimerkiksi käyttöveden lämmitykseen. Lämpöpumpun toiminta perustuu siihen, että matalassa lämpötilassa oleva kylmäaine höyrystyy ja sitoo olomuodon muutoksessa energiaa itseensä. Kylmäainehöyryn painetta kasvatetaan kompressorilla, jolloin samalla lämpötila kasvaa, minkä jälkeen kylmäaine on tulistunutta höyryä. Lauhduttimessa kuuma kylmäaine luovuttaa energiaansa ympäristöön, jolloin tulistus poistetaan ja kylmäaine tiivistyy höyrystä nesteeksi, joka on kuitenkin vielä kompressorin määräämässä paineessa. Jotta kiertoprosessi jatkuu, täytyy kylmäaineen kulkea paisuntaventtiilin läpi, jolloin paine laskee höyrystimen paineeseen. Samalla osa kylmäaineesta höyrystyy lämpötilan laskiessa taas höyrystimen arvoon. Täsmällisempi esitys lämpöpumpujen toiminnasta löytyy esimerkiksi lähteistä [9] ja [22]. Kuvassa 2.2 on esitetty yksinkertaisen maalämpöjärjestelmän osat.

Lämpöpumpun tehokkuutta kuvataan lämpökertoimella, joka on ideaalisessa tapauksessa lauhduttimesta saadun lämpötehon ja kompressorin tehon suhde. Todellisessa laitteessa lämpökertoimen laskennassa huomioidaan esimerkiksi maapiirin liuospumpun ottama teho.

3. LÄMMÖNSIIRTO LÄMPÖKAIVOSSA

Lämpökaivossa lämmönsiirtyminen ympäristöstä lämmönsiirtonesteeseen tapahtuu konvektiolla. Kaivon ulkopuolella lämpö siirtyy johtumalla ja mahdollisen pohjavesivirtauksen mukana. Tässä luvussa esitellään lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt ja U-putken lämmönsiirron yhtälöt sekä puhutaan hieman pohjavesivirtauksen mallintamisesta. COMSOL poikkeaa monista muista numeerisen laskennan ohjelmistoista siinä, että ohjelmasta näkee aina suoraan mitä yhtälöitä ohjelma käsittelee. Tämän luvun lämmönsiirtoa käsittelevien yhtälöiden lähteenä on COMSOL Multiphysics 5.2 -ohjelman sisäinen ohjetiedosto. Varsinaisia COMSOL-malleja ja käytettyjä lukuarvoja käsitellään seuraavassa luvussa.

3.1 Lämmönsiirtoa hallitsevat yhtälöt maassa

Kallion lämpötilakentän ratkaisussa on pieni ero sillä, onko kyseessä puhdas umpikallio vai huokoinen kallio, jossa on vettä. Näille eri tilanteille on COMSOLissa omat laskentamoduulinsa. Kiinteän aineen ja nesteen tapauksessa käytetään moduulia *Heat Transfer in Solids*, jolloin kontrollitilavuuden lämpötilalle T kirjoitetaan osittaisdifferentiaaliyhtälö

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q''' + Q'''_{\text{ted}}, \quad (3.1)$$

missä ρ on materiaalin tiheys ja \mathbf{u} materiaalin nopeus, jota tarvitaan, kun tarkastelu tehdään nesteessä. Lämpövirran tiheys \mathbf{q} [W/m²] pitää sisällään myös lämpösäteilytehon, joka voisi jossain tilanteessa olla yhtenä reunaehtona. Yleisessä tapauksessa

$$\mathbf{q} = -k \nabla T. \quad (3.2)$$

Oikean puolen ensimmäinen termi Q''' [W/m³] sisältää muut lämmönlähteet eli esimerkiksi materiaalissa kehittyvän lämmön, ja viimeinen termi Q'''_{ted} pitää sisällään

lämpölaajenemisesta aiheutuvat termoelastiset vaikutukset. Tämän työn laskentamalleissa myös kaivossa oleva vesi mallinnetaan kiinteänä aineena eikä kaivossa tapahtuvia virtauksia oteta huomioon. Materiaaleille ei myöskään anneta lämpölaajenemiskerrointa eikä laskenta-alueessa ole lämmöntuottoa. Näiden oletusten vuoksi ratkaistava yhtälö yksinkertaistuu muotoon

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0. \quad (3.3)$$

Kun laskentamoduuli ja sen alku- ja reunaehdot on asetettu halutuiksi, COMSOL näyttää yhtälöistä pistekatkoviivalla ratkaisuun liittyvät osat ja loput osat oletetaan nolliksi.

Huokoisessa materiaalissa käytetään moduulia *Heat Transfer in Porous Media*, jolloin yhtälö on periaatteessa sama kuin edellä, mutta se ratkaistaan erikseen kiinteälle materiaalille ja nesteelle. Moduuli olettaa kiinteän aineen (P) olevan paikallaan ja nesteen (L) liikkuvan, jolloin yhtälöt ovat yksinkertaistavien oletusten jälkeen

$$\rho_P c_{p,P} \frac{\partial T_P}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_P = 0. \quad (3.4)$$

ja

$$\rho_L c_{p,L} \frac{\partial T_L}{\partial t} + \rho_L c_{p,L} \mathbf{u} \cdot \nabla T_L + \nabla \cdot \mathbf{q}_L = 0. \quad (3.5)$$

Nämä yhtälöt kerrotaan tilavuusosuuksilla Θ_P ja Θ_L , mikä on sama asia kuin huokoisuus, ja lasketaan yhteen. Tilavuusosuuksien summan on oltava 1 ja lisäksi huokoisessa aineessa elementin sisällä kiintoaineen ja nesteen oletetaan olevan samassa lämpötilassa eli

$$T_P = T_L. \quad (3.6)$$

Näiden yhtälöiden tarvitsemia alku- ja reunaehtoja on käsitelty seuraavassa luvussa mallien käsittelyn yhteydessä.

3.2 Lämmönsiirto U-putkessa

Tässä työssä käytettiin U-putken lämmönsiirron laskentaan COMSOLin *Non-Isothermal Pipe Flow* -moduulia, joka ratkaisee virtauksen lämpötilan, paineen ja virtausnopeuden yksiulotteisena. COMSOL käyttää laskentaan sisäisiä korrelaatiofunktioita, joilla kolmiulotteinen, kaarevareunainen putki lasketaan viivana. Tällöin put-

kelle ei tarvitse luoda laskentaverkkoa erikseen ja yksiulotteinen putki voidaan liittää osaksi moniulotteista laskenta-aluetta. Tämä mahdollistaa sen, että lämmönotto maaperästä kytketään täsmällisesti lämmönsiirtonesteen lämpötilaan ja virtaukseen.

Putkessa virtaavan fluidin energiayhtälö yksiköissä W/m on

$$\rho A c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (A k \nabla T) + f_D \frac{\rho A}{2 d_h} |\mathbf{u}|^3 + Q + Q_{\text{wall}} + Q_P, \quad (3.7)$$

missä A on putken poikkileikkauksen ala, d_h hydraulinen halkaisija, joka pyöreälle putkelle on suoraan putken halkaisija, ja \mathbf{u} on nopeuskenttä. Yhtälössä on hydraulinen halkaisija, koska moduulia voi käyttää muillekin kuin pyöreille poikkileikkauksen muodoille. Yhtälön oikealla puolella oleva toinen termi on kitkan tuottama lämpöteho, missä f_D on kitkakerroin. COMSOLissa on mahdollista valita miten kitkakerroin määritetään. Oletusarvoisesti ohjelma käyttää Churchillin korrelaatiota, koska se pitää sisällään sekä laminaarin että turbulentin alueen. Tämän korrelaatiokaavan esitti vuonna 1977 Stuart W. Churchill [12] muodossa

$$f_D = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \left(\frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right) \right]^{1/12}, \quad (3.8)$$

missä

$$A = \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[\frac{1}{(7/Re)^{0,9} + (0,27 \cdot \epsilon/d)} \right] \right\}^{16} \quad (3.9)$$

ja

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}. \quad (3.10)$$

Edellä olevissa yhtälöissä Re on putken halkaisijan perusteella laskettu Reynoldsin luku (kaava (3.17)), ϵ on putken sisäpinnan karheus ja D on putken halkaisija. Muitakin kitkakerroin malleja, esimerkiksi Haalandin ja Colebrookin korrelaatiot, on valittavissa. Lisäksi kitkakertoimelle voi syöttää haluamansa korrelaation, mutta on syytä huomata, että COMSOL käyttää nimenomaan Darcyn kitkakerrointa, eikä Fanningin kitkakerrointa. Yhtälön (3.7) oikean puolen loput kolme termiä ovat putkessa kehittyvä teho, putken seinämän läpi siirtyvä teho ja tilavuudenmuutostyöhön liittyvä teho, jolla voidaan tarvittaessa ottaa huomioon kokoonpuristuminen. Näistä kolmesta ainoastaan seinämän lämpöteho on työn laskennassa oleellinen.

Yhtälö (3.7) on muilta osiltaan melko selvä, mutta seinämän läpi siirtyvä lämpöteho Q_{wall} on hieman monimutkaisempi termi. Se voidaan kirjoittaa lämmönläpäisyker-

toimen U ja putken perimetrin Z avulla muodossa

$$Q_{\text{wall}} = UZ(T_{\text{ext}} - T), \quad (3.11)$$

missä T_{ext} on lämpötila putken ulkopuolella, joka tämän työn tapauksessa on yhtälöistä (3.3), (3.4) ja (3.5) ratkaistava lämpötila. Tällöin COMSOL muuntaa putken viivalähteeksi, jonka teho kussakin kohdassa riippuu putken sisä- ja ulkopuolen lämpötilaerosta. Laskennassa myös oletetaan, että yhtälössä (3.11) lämpötila asettuu välittömästi tasapainotilaan ja että lämpötila on sama putken joka puolella. Tämä ei lämpökaivossa täsmälleen pidä paikkaansa, koska esimerkiksi lämpimän haaran toinen puoli on kohti viileän haaran putkea.

Lämmönsiirron kannalta seinä koostuu kolmesta kerroksesta, joille jokaiselle voidaan esittää lämmönvastus. Sisä- ja ulkopinnoilla voidaan lämpöteho lausua ΔL -pituiselle pätkälle lämmönsiirtokertoimen h avulla [13]

$$Q = h\Delta L 2\pi r \cdot \Delta T. \quad (3.12)$$

Putken seinässä lämpö siirtyy johtumalla, jolloin lämpövirta saadaan sylinteriseinämälle yhtälöllä [13]

$$Q = \frac{\Delta L 2\pi k}{\ln(r_u/r_s)} \cdot (T_u - T_s), \quad (3.13)$$

missä k on seinämateriaalin lämmönjohtavuus, r on putken säde ja alaindeksit u ja s viittaavat ulko- ja sisäpintoihin. Lämpövirran pitää olla sama jokaisen kerroksen läpi. Yhdistämällä yhtälöt (3.11)–(3.13) saadaan putken lämpökonduktanssille UZ yhtälöksi

$$UZ = \frac{1}{\Delta L} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2\pi\Delta L r_s h_s} + \frac{\ln(r_u/r_s)}{2\pi\Delta L k} + \frac{1}{2\pi\Delta L r_u h_u}}, \quad (3.14)$$

josta saadaan sieventämällä

$$UZ = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_s h_s} + \frac{\ln(r_u/r_s)}{k} + \frac{1}{r_u h_u}}. \quad (3.15)$$

Tämä on yhtälö, jonka COMSOL muodostaa putken seinämälle.

3.2.1 Lämmönsiirtokertoimien määrittäminen

Putkimateriaalin lämmönjohtavuus k on tunnettu ominaisuus, samoin putken sisä- ja ulkosäteet d_s ja d_u . Vielä on selvitettävä lämmönsiirtokertoimet h_s ja h_u , jotka saadaan Nusseltin luvun [13]

$$Nu = \frac{d \cdot h}{k_L} \quad (3.16)$$

korrelaatioista putken sisä- ja ulkopuoliselle virtaukselle. Lukijan on syytä huomata, että kaavassa (3.16) on jakajassa virtausaineen lämmönjohtavuus. Tämä dimensiottomassa muodossa esitetty lämmönsiirtokerroin riippuu virtausaineen ominaisuuksista ja virtauksen käyttäytymisestä, joita kuvaavat dimensiottomat Prandtin ja Reynoldsin luvut. Reynoldsin luku kuvaa virtauksen muuttumista laminaarisesta turbulentiksi. Käytännössä se kuvaa virtausaineeseen vaikuttavien kiihtyvyyss- ja kitkavoimien suhdetta. Se voidaan putkivirtaukselle laskea kaavasta

$$Re = \frac{u \cdot d_s}{\nu}, \quad (3.17)$$

missä u on virtauksen keskinopeus, d_s putken sisähalkaisija ja ν virtausaineen kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]. Prandtin luku kuvaa liikemäärän ja lämpöenergian diffusiviteettien suhdetta virtausaineessa. Se voidaan kaavana kirjoittaa muodossa

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k_L}, \quad (3.18)$$

missä μ on dynaaminen viskositeetti ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). Kaavassa mainittu α on termien diffusiviteetti, jonka määritelmä on

$$\alpha = \frac{k_L}{\rho c_p}, \quad (3.19)$$

joka kuvaa lämpötilan muutosten etenemisnopeutta aineessa.

3.2.2 Sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin

Pyöreässä putkessa täysin kehittyneelle, turbulentille virtaukselle, jolle Prandtin luku Pr on alueella 0,5–2000 ja Reynoldsin luku Re alueella 2300– $5 \cdot 10^6$, pätee Gnielnskin kaava [23]

$$Nu = \frac{(f_D/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f_D/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}, \quad (3.20)$$

jota myös COMSOL käyttää. Täysin kehittyneelle laminaarille sisäpuoliselle virtaukselle pyöreässä putkessa [23]

$$Nu = 3,66. \quad (3.21)$$

Mikäli käyttäjä asettaa COMSOLiin lämmönsiirtokertoimen laskennan automaattiseksi, käyttää ohjelma näitä korrelaatioita laskemansa Reynoldsin luvun perusteella. Tämä ei kuitenkaan näytä toimivan ohjelmassa aivan näin suoraviivaisesti, koska vaikka Reynoldsin luku viittaisi laminaariin virtaukseen, saattaa ohjelma laskea Nusseltin luvun turbulentin virtauksen kaavalla. Tähän palataan työn tulosten yhteydessä luvussa 5. Jos mallissa käytetään COMSOLin materiaalikirjaston aineita tai aineominaisuuksien lämpötilariippuvuus annetaan ohjelmalle esimerkiksi taulukkomuodossa, laskee ohjelma automaattisesti aineominaisuudet pinnan ja ympäristön keskimääräisessä lämpötilassa.

3.2.3 Ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin

Ulkopuoliselle luonnolliselle konvektiolle COMSOL käyttää Churchill–Chu -korrelaatiota [13]

$$Nu = \left(0,60 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right)^2, \quad (3.22)$$

joka pätee kun $Ra > 10^9$, missä Rayleighin luku Ra on

$$Ra = Pr \cdot \frac{g\beta|T_u - T_{ext}|d^3}{\nu^2}, \quad (3.23)$$

missä g on putoamiskiihtyvyys, β tilavuuden lämpötilakerroin ja d putken halkaisija. On syytä huomata, että korrelaatio (3.22) on vaakasuoralle putkelle. Tämän työn mallinnuksessa ei kuitenkaan ole kaivossa painovoimaa mukana nimenomaan siksi, että lämmönsiirtokerroin laskettaisiin pelkkänä johtumisena. Näin ollen korrelaatiolla ei pitäisi olla tulosten kannalta suurta merkitystä. Pelkkä johtuminen valittiin siksi, että jos lämpötila U-putkessa on noin 0 °C ja kaukana ympäristössä 8 °C, on mahdollista, että kaivossa olevan veden lämpötila on jossain kohdassa 4 °C, jolloin veden tiheys on suurimmillaan ja virtaus on alaspäin, kun se voi toisaalla kaivossa olla ylöspäin. Tällaisen tilanteen laskentaverkon pitäisi olla erittäin tiheä ja ylipäätään ohjelman toimivuus tilanteelle pitäisi tarkastella erikseen. Tähän ei tässä työssä haluttu lähteä. Pipe Flow -moduuliin on mahdollista syöttää haluttu Nusseltin luvun korrelaatio kaavamuodossa, mutta tässä työssä pitäydyttiin ohjelman sisäisissä kaavoissa.

3.3 Pohjavesivirtaus ja Darcyn laki

Pohjavesi on vettä, joka vedellä kyllästetyssä alueessa täyttää kokonaan kallioperän huokostilan ja muut avoimet tilat. Pohjavettä sisältävää ja hyvin vettä läpäisevää aluetta kutsutaan akviferiksi. Akviferi on hydraulisesti yhtenäinen alue. Maa-aineen kykyä läpäistä vettä kutsutaan vedenläpäisevyydeksi tai hydrauliseksi johtavuudeksi K , jonka yksikkö on m/s. Käytännössä vedenläpäisevyys ei ole sama vaak- ja pystysuunnissa. Vedenläpäisevyyden lisäksi pohjaveden liikkeeseen vaikuttaa kiintoaineen huokoisuus Θ_L , joka ilmaisee prosenttilukuna huokostilan osuuden kokonaistilavuudesta. Graniitille $K = 10^{-4} - 10^{-11}$ m/s ja huokoisuus on alle 10 %:a. [24]

Henry Darcy esitti vuonna 1856 kokeellisen lain, jonka mukaan pohjaveden virtausnopeus q_V maa-aineksessa on verrannollinen vedenläpäisevyyteen ja hydrauliseen gradienttiin dh/dx . Jos maa-aineksen oletetaan olevan läpäisevyyden osalta isotrooppinen, saadaan vaakasuuntainen nopeus Darcyn laista [25]

$$q_V = K \cdot \frac{dh}{dx}, \quad (3.24)$$

missä dh on hydraulisen korkeuden (paine metreinä) muutos vaakasuuntaisella matkalla dx . Täsmällisesti sanottuna Darcyn laki kertoo pohjaveden tilavuusvirran tiettyä maakerroksen poikkipinta-alaa kohti, mitä kutsutaan Darcyn nopeudeksi. Varsinainen veden keskimääräinen nopeus voidaan laskea huokoisuuden Θ_L avulla kaavasta

$$v = \frac{q_V}{\Theta_L}. \quad (3.25)$$

Darcyn laki pätee tarkasti mikäli raekoon mukaan laskettu Reynoldsin luku on korkeintaan 10. Pohjavesivirtauksille tämä yleensä toteutuu. Darcyn laki voidaan esittää myös muodossa

$$q_V = \frac{\kappa}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x}, \quad (3.26)$$

missä κ on permeabiliteetti (m^2) ja μ on dynaaminen viskositeetti ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), jolloin paine-ero ilmoitetaan pascaleina tietyllä vaakasuoralla matkalla Δx . [28].

COMSOLista löytyy oma moduulinsa Darcyn lain lisäämiseksi. Ohjelma yhdistää automaattisesti Darcyn lain (kaava (3.24)) huokoisen aineen lämmönsiirtoon (kaava (3.5)).

Täsmällisiä tai edes suuntaa antavia hydraulisen gradientin arvoja erityisesti Suomen kallioperään ei laskentaa varten löytynyt, mutta oletettavasti kallio ja pohjaveden käyttäytyminen on samantyyppistä kuin Ruotsissa, jossa hydraulinen gradientti on Åbergin ja Johanssonin 1988 julkaistun *Vattenströmning till och från borrhålsvärmelager* -raportin mukaan tyypillisesti 0,01–0,001 [26]. Pohjaveden virtausnopeus Pohjoismaisessa graniitissa on näin ollen Darcyn lain mukaan suurimmillaan noin

$$q_V = 10^{-4} \text{ m/s} \cdot 0,01 = 10^{-6} \text{ m/s}, \quad (3.27)$$

ja pienimmillään suuruusluokkaa

$$q_V = 10^{-11} \text{ m/s} \cdot 0,001 = 10^{-14} \text{ m/s}. \quad (3.28)$$

Skaala on huomattavan suuri, joten pohjaveden kunnollinen huomioiminen simuloinnissa vaatisi ainakin jonkinlaisen käsityksen siitä, mikä pohjaveden virtaus simuloitavassa kohteessa todellisuudessa on.

3.4 Pohjaveden vaikutus lämmönsiirtoon

Pohjaveden virtauksella voi olla merkittävä vaikutus maalämpökaivon mitoittamiseen. Analyyttistä ratkaisua ongelmaan ei ole mahdollista saada ja numeerinen simulointi vaatii sopivan ohjelmiston. Pohjaveden virtauksen merkittävyttä ja sitä kautta simuloinnin tarpeellisuutta voi kuitenkin arvioida vertailemalla maaperässä johtumalla ja veden mukana advektiolla siirtyviä suhteellisia lämpövirtoja. [27]

Advektion (konvektion) ja johtumisen suhdetta kuvaa dimensioton Péclet'n luku, jonka määritelmä on Bearin [28] mukaan

$$Pe = \frac{\rho_v c_{p,v} q_V L}{k_e}, \quad (3.29)$$

missä tiheys ja ominaislämpökapasiteetti on annettu vedelle, q_V on Darcyn virtausnopeus ja k_e akviferin efektiivinen lämmönjohtavuus. Vähän huokoisessa kalliiossa tämä on siis melkein sama kuin kallion lämmönjohtavuus. Kaavassa oleva L on jokin vapaasti valittavissa oleva geometriaa kuvaava karakteristinen mitta. Suuri Péclet'n luku tarkoittaa sitä, että advektio on hallitseva mekanismi, ja pieni luku sitä, että johtuminen on merkitsevä mekanismi. Rajakohdan täsmällinen lukuarvo riippuu kuitenkin siitä, miten karakteristinen mitta valitaan.

Bear mainitsee, että käytettäessä huokoisen aineen keskimääräistä raekokoa, johtuminen on dominoiva mekanismi Péclet'n luvun ollessa pienempi kuin 0,4 ja advektion olevan voimakkaampi luvun ollessa suurempi kuin 5. Nämä luvut perustuvat Bearin mukaan lukuisiin tehtyihin mittauksiin.

Chiasson et al. [29] ovat käyttäneet karakteristisena mittana lämpökaivojen välistä etäisyyttä. Heidän mukaansa Péclet'n luku saa ykköistä suurempia arvoja vain hienojakoisessa maa-aineessa kuten hiekassa ja sorassa, kun se kovilla kiviaineksilla on välillä 10^{-2} – 10^{-7} . Heidän tekemässään simulaatiossa pohjaveden virtauksella alkoi olla merkitystä, kun Péclet'n luku oli suurempi kuin 1.

Pasquale et al. [30] ovat käyttäneet karakteristisena mittana akviferin paksuutta, ja heidän mukaansa advektio on pääasiallinen lämmönsiirtomekanismi, kun $Pe \gg 1$. Eskilson [31] on määritellyt Péclet'n luvun muodossa

$$Pe = \frac{\rho_v c_{p,v} q_v H}{2k_e}, \quad (3.30)$$

missä H on kaivon syvyys. Hänen mukaansa pohjaveden virtausta ei tarvitse ottaa huomioon, mikäli $Pe < 1$. Tämän määritelmän mukaan 100 m syvälle kaivolle keskimääräisessä kalliossa saadaan keskimääräisellä Darcyn nopeudella 10^{-10} m/s

$$Pe = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4200 \text{ J/kgK} \cdot 10^{-10} \text{ m/s} \cdot 100 \text{ m}}{2 \cdot 3 \text{ W/mK}} = 0,007. \quad (3.31)$$

Näyttää siis siltä, että käytännössä rajakohdaksi voidaan valita arvo 1. Pohjaveden virtausnopeuden pitää olla suuri eli toisin sanoen maan pitää olla hyvin läpäisevä ja hydraulisen gradientin tulee olla riittävän suuri. Péclet'n luvun määritelmiin ja lukuarvoihin palataan työn tuloksien käsittelyn yhteydessä luvussa 5.

4. COMSOL MULTIPHYSICS

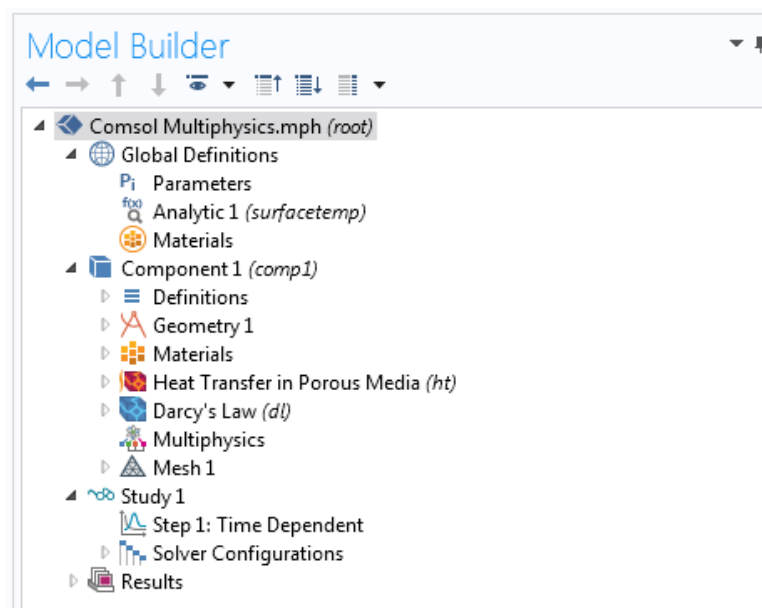
Tässä luvussa esitellään COMSOL-mallin luominen ja työssä käytetyt mallinnusparametrit. Tavoite on, että lukija pystyy halutessaan kokeilemaan itse mallinnusta ja tarvittaessa kehittämään työtä eteenpäin. Nimensä mukaisesti COMSOLilla on mahdollista käsitellä useita erilaisia fysikaalisia ilmiöitä, joita voi helposti kytkeä toisiinsa. Tässä työssä on kytketty toisiinsa lämmönsiirto ja virtauslaskenta, mutta yhtä hyvin onnistuisi esimerkiksi lämmönsiirron ja materiaalien mekaniikan tai virtauslaskennan ja akustiikan kytkentä.

Kaikilla tarkasteltavilla fysiikan osa-alueilla mallinnus tapahtuu kuitenkin samalla tavalla. COMSOLin perusversio ei sisällä kaikkia mahdollisia laskentamoduuleita, esimerkiksi tässä työssä käytettyä Pipe Flow -työkalua. Moduuleja kutsutaan COMSOLissa fysiikoiksi. COMSOLissa on yhdessä ohjelmassa geometrian luonti, laskenta-asetukset, verkotus, ratkaisin ja jälkikäsittely. Lisäksi COMSOLilla on asiakkailleen erinomainen tekninen tuki, josta tämänkin diplomityön tekemisen aikana on ollut suunnaton apu.

Erityisesti numeeriseen laskentaan liittyviä käsitteitä ja periaatteita ei tässä raportissa esitetä, vaan aiheeseen perehtymätöntä lukijaa kehoitetaan lukemaan esimerkiksi Versteegin ja Malalasekeran kirja virtauslaskennan numeriiikasta [32]. Lämmönsiirron numeerisia ratkaisumenetelmiä on esitetty Millsin lämmönsiirron kirjassa [13].

4.1 Mallipuun käyttäminen

Kun COMSOLista on valittu millaista geometriaa (2D, 3D, sylinterisymmetria, jne.) tarkastellaan ja tehdäänkö tarkastelu aikariippuvana vai stationaarina, aukeaa näkyviin mallipuu, jolla laskentamalli rakennetaan. Malli toimii todennäköisesti helpoiten, kun puu täytetään ylhäältä alaspäin. Kuvassa 4.1 on esimerkki mallipuusta, johon on jo valittu tarkasteltavat fysiikat.



Kuva 4.1 COMSOLin mallipuu.

Kohtaan *Parameters* on mahdollista tallentaa erilaisia lukuarvoja kirjaintunnusten alle. Globaalit parametrit voivat olla myös laskukaavoja ja riippua matemaattisesti toisistaan. Parametrien määrittelyllä on merkitystä varsinkin silloin, jos sama tehtävä halutaan ratkaista usealla erilaisella tietyn parametrin arvolla. Jos muuttuja on määritetty täällä, COMSOLin ratkaisija pystyy muuttamaan sitä lennosta *Parametric Sweep* -toiminnolla. Tässä työssä tällä tavoin on tarkasteltu esimerkiksi kaivojen välisen etäisyyden vaikutusta lämpötilakenttään. Ylipäätään suureet on syytä syöttää ohjelmaan parametreina, jolloin tietyn suureen lukuarvo tarvitsee vaihtaa vain yhteen paikkaan.

Alkuun voi myös määritellä monenlaisia funktioita. Kuvassa 4.1 on määritetty analyttinen yhtälö nimeltään *surfacetemp*, joka on työn tapauksessa

$$surfacetemp(t) = 283[\text{K}] + 10[\text{K}] \cdot \sin(t/(365 \cdot 24[\text{h}])). \quad (4.1)$$

Tämä yhtälö asetetaan lämmönsiirtofysiikan reunaehdoksi maan pintaan ja sillä pyritään mallintamaan vuodenaikojen vaihtelua. Täällä määritettyjä yhtälöitä voi kutsua nimellä missä tahansa muualla mallipuussa. COMSOLin yhtälöissä on tärkeää kertoa ohjelmalle missä yksiköissä lukuarvot ovat, koska ohjelma olettaa fysikaalisten suureiden olevan tietyssä yksikössä, mutta osaa muuntaa ne tarvittaessa. Esimerkiksi pituusmitat voi syöttää millimetreinä, kunhan yksikkö on mukana, jolloin ohjelma

muuntaa mitat metreiksi. Yksikön voi ilmoittaa hakasulkeita käyttäen, esimerkiksi $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ kirjoitetaan COMSOLiin muodossa `2[degC]`, joka laskennassa muutetaan automaattisesti kelvineiksi. Jokaiseen kohtaan, mihin ohjelmassa voi syöttää lukuarvon, voi syöttää yhtälön, joten eri suureiden riippuvuus toisiinsa, ratkaistaviin suureisiin tai koordinaatistoon on helppo sisällyttää laskentaa.

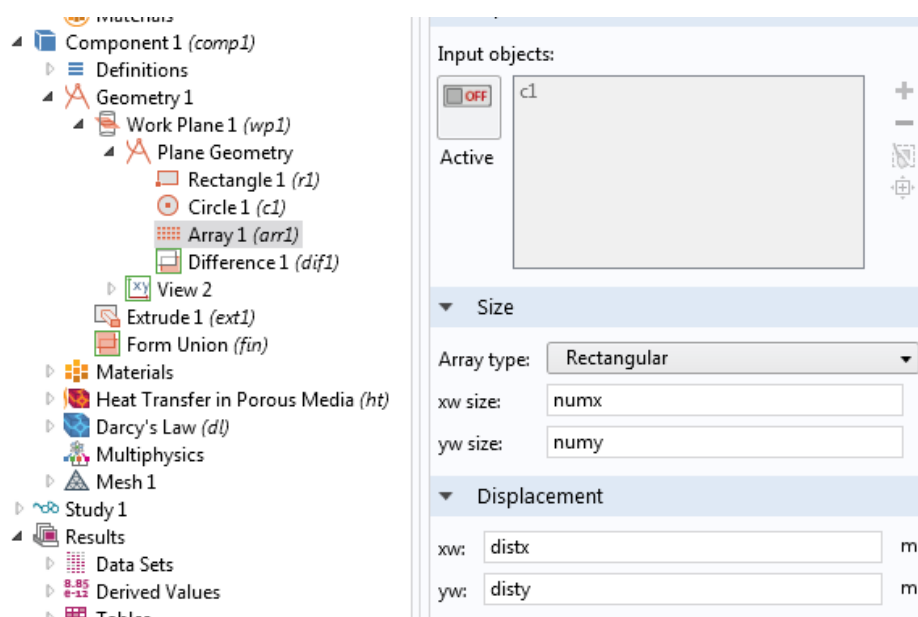
Kohtaan *Definitions* voi määritellä esimerkiksi erilaisia antureita (*probe*), joilla saa tuloksista tietoa jo laskennan aikana. Tässä työssä on käytetty viivamaista anturia, josta saadaan lämpökaivon pienin lämpötila jokaisella aika-askeleella. Tämä on suositeltavaa siksi, että usean tunnin simulaatiosta voi tarkistaa heti alkuun, onko siitä tulossa jotain järkevää vai pelkkää soopaa, jolloin laskennan voi keskeyttää heti alkuunsa. Ilman probeja COMSOL ei näytä tuloksia laskennan aikana.

4.2 Geometrian luonti

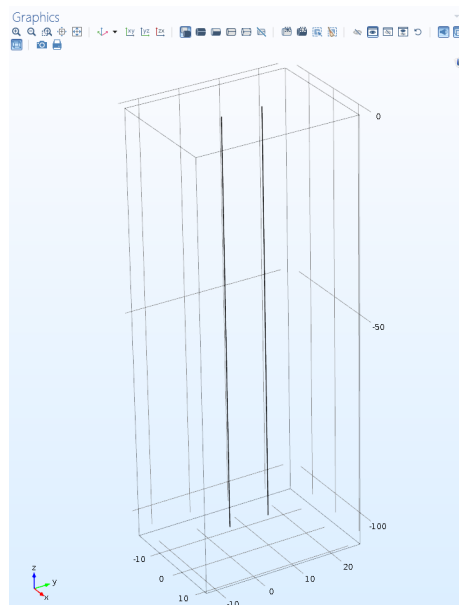
COMSOL toimii useimpien CAD-ohjelmien kanssa yhdessä, joten valmiin geometrian tuonti ohjelmaan onnistuu kätevästi. Geometrian voi myös itse luoda erilaisista ohjelman tarjoamista palikoista. Lämpökaivojen tapauksessa on helpompaa luoda ensin työtaso (*Work Plane*), johon halutut kaivot piirretään ympyröinä. Toiminnolla *Extrude* saadaan tästä tasosta venyttämällä kolmiulotteinen geometria. Esimerkki tästä on kuvassa 4.2. Jos halutaan tehdä useita kerroksia, saa ohjelmaan laitettua saman Extrude-komennon sisään useita arvoja venytykselle, jolloin jokaisesta muodostuu oma kerroksensa.

Kuvassa 4.2 on käytetty myös *Array*-toimintoa, jolla yhtä ympyrää monistetaan tietyn kuvion muotoon. Kuvassa on määritelty neliönmuotoinen ryhmitys, johon tulee vaaka- ja pystysuunnissa *numx* ja *numy* kappaletta samanlaisia ympyröitä. Ympyröiden väliset etäisyydet on määritelty parametreilla *distx* ja *disty*. Tällä tavalla on siis mahdollista nopeasti luoda suuriakin lämpökaivokenttiä. Kuvassa käytetty *Difference*-toiminto leikkaa kaivot laskentaa-alueesta pois, joten fyysiikoita ei ratkaista kaivojen sisällä ja kaivon reuna toimii sylinterilähteenä. Kuvassa 4.3 on esitetty laskenta-alue kahden lämpökaivon systeemille.

Geometrian luonnin jälkeen varsinkaan pyöreät objektit eivät välttämättä ruudulla näytä sellaisilta kuin voisi ajatella. Tällä ei kuitenkaan ole mitään merkitystä, koska vasta geometrian verkottaminen määrää sen millaista geometriaa ohjelma yrittää ratkaista. Pitkät putket esimerkiksi piirtyvät kuvaan neliskanttisina, mutta ne kyllä



Kuva 4.2 Geometrian luonti Extrude- ja Array-toiminnoilla.

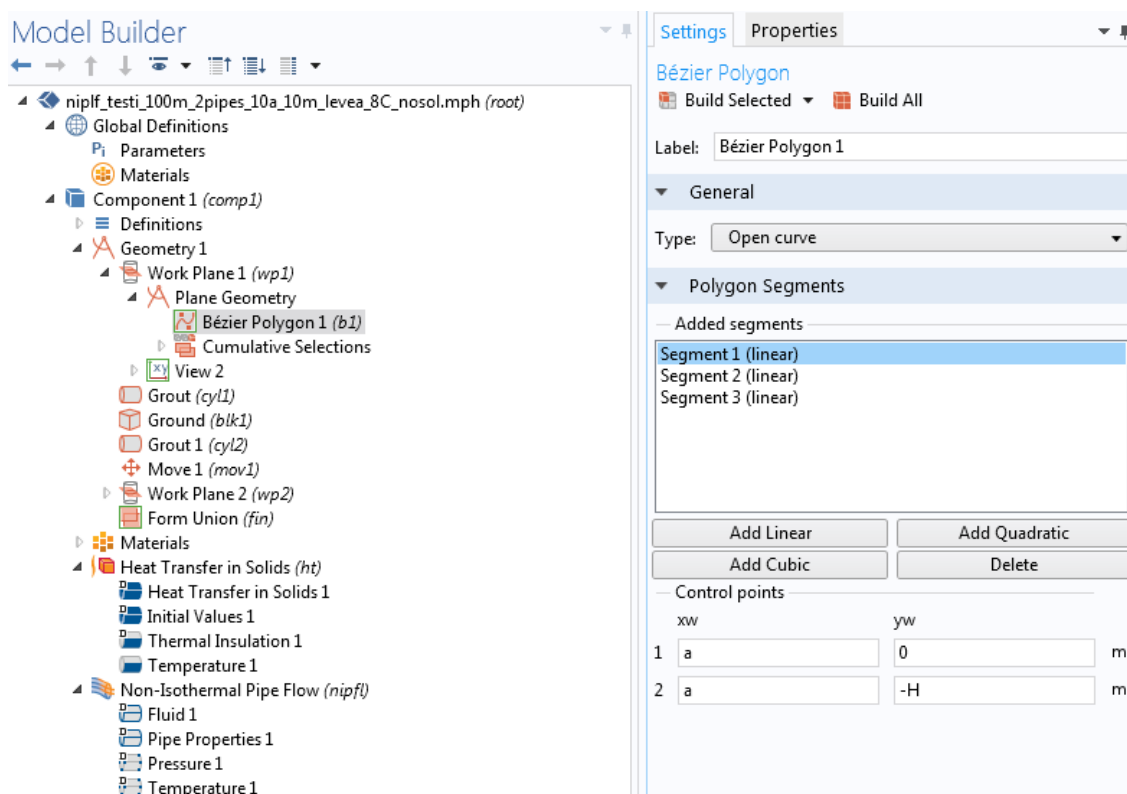


Kuva 4.3 Geometria kahdelle lämpökaivolle. Kaivojen etäisyys on 10 m.

lasketaan pyöreinä, mikäli verkko luodaan riittävän tiheäksi. Ohjelma ymmärtää verkkoa luodessaan, että geometria on tarkoitettu pyöreäksi.

Pipe Flow -fysiikka tarvitsee putken, joksi riittää yhtenäinen avoin viiva. Tätä varten täytyy luoda työtaso, johon viiva piirretään. Viivan voi määritellä matemaattisesti tai esimerkiksi Bézier-polygonina, kuten kuvassa 4.4 on tehty, jossa parametri a

on U-putken haaran etäisyys kaivon keskeltä ja H kaivon syvyys. Putken toinen haara tulee kohtaan $-a$. Maaperä (Ground) ja kaivot (Grout) on luotu valmiilla geometrioilla. Työn laskennassa $a = 4$ cm ja kaivon halkaisija on 140 mm.



Kuva 4.4 Putken geometrian luonti Pipe Flow -moduulia varten.

Tässä työssä U-putket piirrettiin kolmena suorana viivana. Putken muodolla on merkitystä Pipe Flow -moduulin kanssa painehäviötä laskettaessa, mutta 90 asteen terävät mutkat eivät käytännössä lämmönsiirtoon vaikuta. *Cumulative Selections* -toiminnolla viivat on yhdistetty yhtenäiseksi kappaleeksi. Kuvassa 4.4 näkyy toinen työtaso (*Work Plane 2*), joka on ensimmäisen kopio. Näin saadaan luotua helposti toinen samanlainen putkigeometria. Sitä voidaan toiminnolla *Move* siirtää tietyn matkan verran johonkin suuntaan. Tämä on työssä parametrisoitu siten, että jos kaivojen etäisyyttä muutetaan, saadaan koko kentän geometria muutettua yksinkertaisesti päivittämällä kaikki geometrian objektit. Muidenkin geometrian osien koot on sidottu kaivojen väliseen etäisyyteen L ja yhden kaivon syvyyteen H , joten kahta arvoa muuttamalla saadaan koko laskenta-alue muutettua sopivaksi.

4.3 Materiaalit

COMSOLista löytyy materiaalikirjasto, jossa on käytössä olevan lisenssin määrittämät materiaalit. Lämpötekniset ominaisuudet ovat kirjastomateriaaleissa lämpötilasta ja paineesta riippuvia ja ohjelma laskee ne aina vallitsevissa olosuhteissa. Materiaaleja on erittäin helppo luoda itse, jos haluttua ainetta ei ole kirjastossa. Tässä työssä luotiin aineeksi 41 %:nen etyleeniglykolin vesiliuos (taulukko 4.1). Etyleeniglykoli puhtaana aineena löytyy COMSOLin kirjastoaineista.

Taulukko 4.1 Etyleeniglykolin vesiliuoksen (41 %) lämpötekniset aineominaisuudet lämpötilassa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

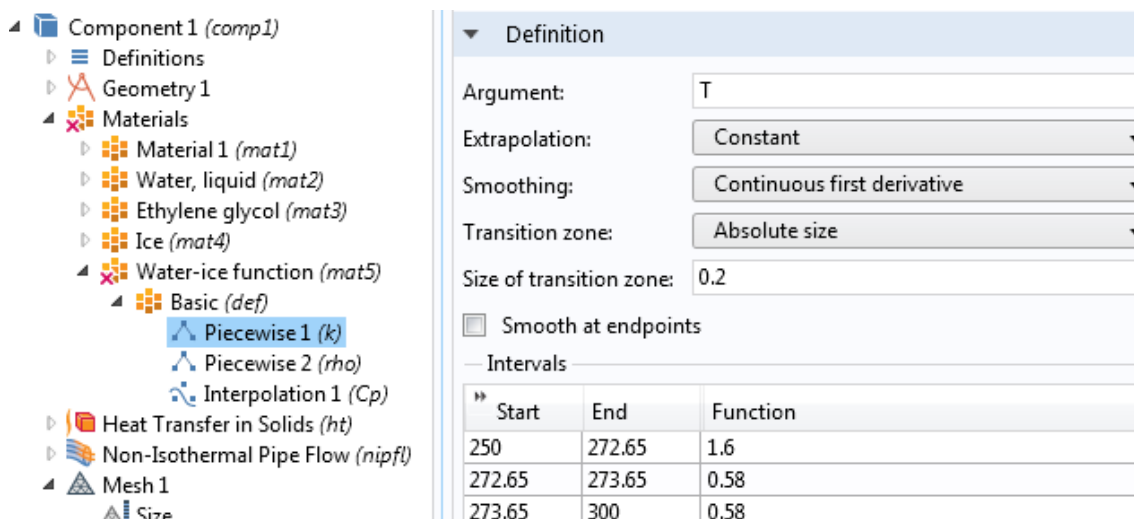
Tiheys ρ	1068	kg/m ³
Lämmönjohtavuus k	0,39	W/mK
Ominaislämpökapasiteetti c_p	3,34	kJ/kgK
Kinemaattinen viskositeetti ν	11,65	mm ² /s

Ensimmäisenä ohjelmaan valittu materiaali asetetaan automaattisesti koko laskenta-alueeseen, joten muiden materiaalien lisäämisen jälkeen riittää materiaalien vaihtaminen haluttuihin alueisiin. Ohjelma saattaa näyttää materiaalien kohdalla virheilmoitusta esimerkiksi puuttuvista materiaaleista, mutta tämä voi johtua siitä, ettei fysiikoita ole vielä asetettu oikein.

Tässä työssä kokeiltiin myös olomuodon muutoksen huomioonottamista laskentamallissa. Tähän on COMSOLissa valmis *Heat Transfer with Phase Change* -fysiikka, jossa tiettyyn alueeseen asetetaan kaksi materiaalia, esimerkiksi vesi ja jää, ja kerrotaan ohjelmalla missä lämpötilassa olomuodonmuutos tapahtuu. Tämä fysiikka ei kuitenkaan toimi Pipe Flow'n kanssa, koska jälkimmäiseen pitää asettaa materiaaliksi esimerkiksi vesi, eikä moduuli ota huomioon sitä, jos vesi muuttuu jääksi [33]. Tässä tapauksessa aineominaisuudet voidaan kirjoittaa paloittain määritellynä tietyllä lämpötilavälillä (kuva 4.5) tai pisteittäin, joiden välillä COMSOL osaa interpoloida lukuarvon (kuva 4.6).

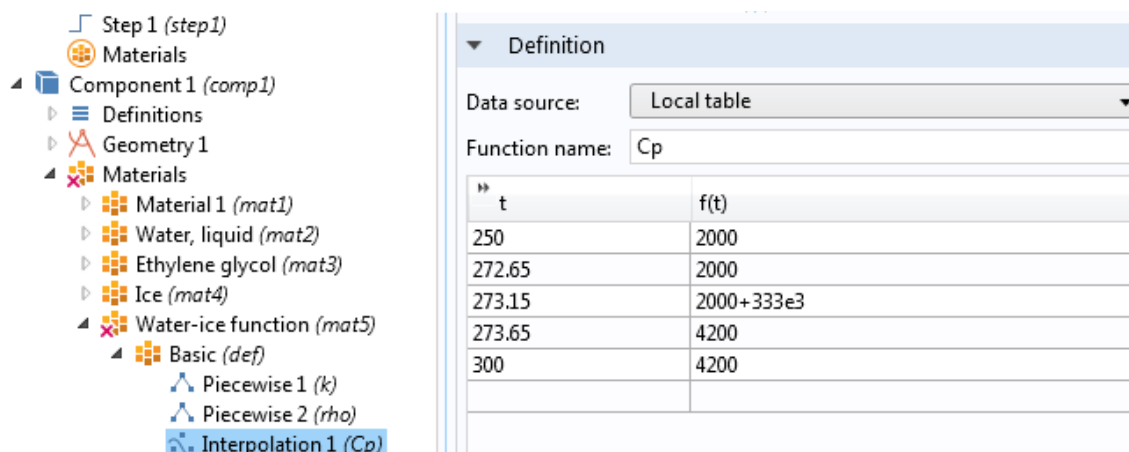
4.4 Laskentamoduulit

Malliin valitut laskentamoduulit eli fysiikat näkyvät allekkain mallipuussa. Fysiikkoja ei käyttäjän tarvitse itse kytkeä toisiinsa, vaan ohjelma tekee sen automaattisesti, mikäli fysiikoiden yhtälöt riippuvat toisistaan. Mallipuuhun tulee tällöin *Multiphysics*-kohta, jolle käyttäjän ei tarvitse tehdä mitään. Käyttäjän pitää valita, missä



Start	End	Function
250	272.65	1.6
272.65	273.65	0.58
273.65	300	0.58

Kuva 4.5 Aineominaisuuden luonti olomuodon muutosta varten paloittain määriteltynä.

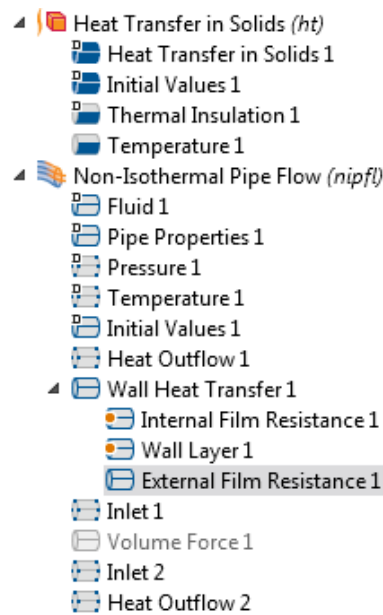


t	f(t)
250	2000
272.65	2000
273.15	2000+333e3
273.65	4200
300	4200

Kuva 4.6 Aineominaisuuden luonti olomuodon muutosta varten pisteittäin määriteltynä. Sulamislämpö on otettu huomioon ominaislämpökapasiteetissa piikkinä sulamislämpötilan kohdalla.

alueessa mitäkin fysiikkaa ratkaistaan. Esimerkki monifysiikkatilanteesta on esitetty kuvassa 4.7.

Kuvassa 4.7 näkyvät fysiikoiden vaatimat alku- ja reunaehdot. Lämmönsiirtomoduulissa oletusarvona on se, että kaikki alueen ulkoreunat ovat lämpöeristettyjä (*Thermal Insulation 1*), eikä tätä tarvitse itse asettaa. Sisäkkäisistä alueista on kuitenkin syytä poistaa välistä lämpöeristys, mikäli lämpö saa siirtyä alueesta toiseen. Kohtaan *Initial Values 1* voidaan asettaa alkuarvo koko fysiikan alueelle. Tämän työn tapauksessa alkulämpötilaksi maaperälle ja kaivolle valittiin 8 °C. Tämä on Suomen olosuhteisiin hieman korkea luku, mutta koska lämmönsiirtonesteen sisään-



Kuva 4.7 Malliin valitut fysiikat, jotka ovat kuvan tapauksessa lämmönsiirto kiinteässä aineessa ja Pipe Flow.

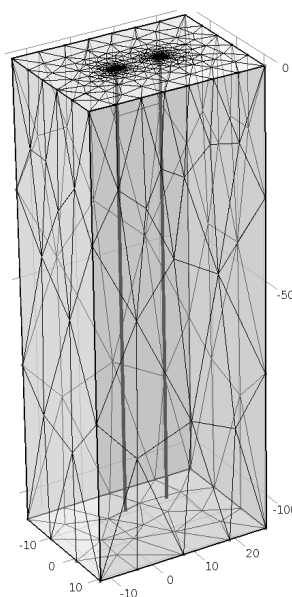
menon lämpötilaksi valittiin $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, säädettiin maaperän lämpötila niin, että nesteeseen varmasti siirtyy lämpöä. Saman fysiikan alla voi ratkaista useampaa eri aluetta, esimerkiksi jos aineominaisuudet tai alkuarvot jossain tietyssä tilavuudessa poikkeavat muusta alueesta. Kuvan 4.7 tapauksessa voitaisiin vaikkapa lisätä *Heat Transfer in Solids 2*, jolla huomioitaisiin esimerkiksi maan pintakerros. Tässä työssä koko maaperä on mallinnettu yhtenäisenä kalliona.

Näiden lisäksi käyttäjä voi itse valita haluamiaan alku- tai reunaehtoja. Tällainen on tässä työssä maan pintalämpötilan jaksottainen vaihtelu, joka määriteltiin yhtälöllä (4.1). Reunaehdolla olisi mahdollista ottaa huomioon myös esimerkiksi Auringon säteily. Tässä tapauksessa yksi reunaehto tulee siitä, että U-putki ottaa lämpöä maasta. Käytettäessä sylinterilähdettä voidaan kaivon pintaan asettaa reunaehdoksi lämpövuoto sisäänpäin.

Pipe Flow tarvitsee useampia alkuarvoja. Kohtaan *Fluid 1* voidaan valita suoraan mallin materiaaleista neste. Putkelle pitää asettaa (*Pipe Properties 1*) muoto (pyöreä, suorakaide), ulkohalkaisija ja seinämän vahvuus ja lisäksi kitkakerroinmalli ja seinämän karheus. Tämän työn putkelle valittiin Acunan [11] mukaan halkaisijaksi ja paksuudeksi 40 mm ja 2,4 mm, ja seinämän karheudeksi oletettiin 0,0015 mm. Kitkakerroin lasketaan oletusarvoisesti Churchillin korrelaatiosta (kaava (3.8)), koska tämä korrelaatio toimii sekä laminaarille että turbulentialle virtaukselle.

Sisäänmenon paine ja lämpötila ($2\text{ }^{\circ}\text{C}$) annetaan reunaehtoina. Moduuli ratkaisee myös paineen muutoksen putkessa, joten paineelle on annettava arvot, vaikkei niistä erityisesti oltaisi kiinnostuneita. Alkuehtona kohtaan *Initial Values 1* asetetaan lämpötila ja jokin virtausta kuvaava suure, esimerkiksi virtausnopeus. Lämpötilaksi asetettiin sama arvo kuin sisäänmenossa ja virtaukselle annettiin reunaehdoksi sisäänmenon tilavuusvirta $0,5\text{ dm}^3/\text{s}$, joka on Acuñaan mukaan tavallinen arvo [11]. Jälkeenpäin ajatellen tämä tilavuusvirta olisi varmuuden vuoksi voinut olla hieman isompikin, koska virtauksen pitäisi U-putkessa olla turbulenti. Tällä tilavuusvirran arvolla virtaus on Reynoldsin luvun perusteella laminaarinen. Lisäksi moduuli tarvitsee tiedon siitä, mistä päästä putkea tavaraa tulee sisään. Tämä asetetaan *Inlet*-ehdolla. Työn malleissa on kaksi putkea, joten molemmille on oma sisääntulonsa. Samaten ulosmenolle voidaan antaa jokin ehto, joksi tässä työssä on valittu lämmön ulosvirtaus. Nesteen, putken ominaisuudet ja muut alkuarvot voi asettaa samalla kertaa kaikille putkille, mikäli ne ovat samoja. Ohjelma ei aseta niitä automaattisesti, joten käyttäjän on huolehdittava, että ominaisuudet tulevat jokaiseen laskettavaan putkeen. Ennen laskennan aloittamista kannattaa käydä läpi kaikki fysiikat sekä alku- ja reunaehdot, ja tarkistaa että ne ovat varmasti oikeissa paikoissa.

Monimutkaisin reunaehto on putken seinämän lämmönsiirto. Tämä täytyy lisätä käsin ja sen sisältämät sisä- ja ulkopuoliset kalvopinnat ja seinämä asetetaan käyttäjän toimesta. Kerroksia ei ole pakko lisätä, esimerkiksi putken ulkopinta voi olla ympäristön lämpötilassa. Kohtaan *Internal Film Resistance 1* asetetaan virtausaineen materiaali ja lämmönsiirtokerroimen laskenta. Jos laskenta asetetaan automaattiseksi, käyttää COMSOL kaavaa (3.20). *Wall Layer 1* sisältää putken seinämän paksuuden ($2,4\text{ mm}$) ja lämmönjohtavuuden, joka tämän työn laskennassa on polyeteenin $0,4\text{ W/mK}$. Pipe Flow -moduuli ei laske lämpötilajakaumaa putken seinässä, eikä ota huomioon seinämän lämpenemistä, joten muita aineominaisuuksia ei tarvitse putkimateriaalille antaa. Ulkopinnan *External Film Resistance 1* -kohdassa asetetaan ulkopuolen materiaali, joksi voi suoraan valita viereisen laskenta-alueen materiaalin, lämmönsiirtokerroimen laskenta sekä suure, joka liittyy putken sisäpuolen lämpötilan ulkopuoleen. Tämä suure voi olla esimerkiksi ulkopuolinen lämpötila, jota tässä työssä käytettiin. Lämmönsiirtokerroimen laskennassa voi käyttää automaattista toimintoa, mutta käyttäjän on erikseen asetettava onko kyseessä luonnollinen vai pakotettu konvektio. Tässä työssä putken ulkopuolen lämmönsiirto käsitellään pelkästään johtumisena, joten laskentamalleihin on valittu luonnollinen konvektio, jolloin lämmönsiirtokerroin lasketaan kaavasta (3.22).



Kuva 4.8 Laskentaverkko 100 metriä syville ja 10 metrin etäisyydellä oleville lämpökaivoille.

4.5 Laskentaverkko

Ohjelma tekee oletusarvoisesti 3D-malleihin tetraedrin muotoisia laskentaelementtejä. Ohjelmassa on pikavalinta, jolla saadaan luotua fysiikkaan sopiva verkko. Käyttäjän on myös mahdollista itse valita elementtien suurin ja pienin koko, kasvusuhteet ja muut verkon tiheyteen vaikuttavat suureet. Tässä työssä kallion pystysuuntainen lämpötila ei vaihtelee, joten verkko on pystysuunnassa erittäin harva, kuten kuvasta 4.8 näkyy. Kaivon kohdalla elementit ovat korkeintaan muutaman senttimetrin halkaisijaltaan, kaukana kaivosta useita metrejä.

Laskennat tehtiin mahdollisimman harvalla verkolla, jotta laskenta-ajat eivät venyisi valtavan pitkiksi. Laskentaelementtejä työssä lasketuissa malleissa oli tapauksesta riippuen 400 000 – 600 000. Myös laskenta-alueen koon merkitystä tutkittiin. Testien perusteella näytti siltä, että kaivojen ympärille molempiin suuntiin on syytä jättää vähintään kaivojen etäisyyden verran tilaa. Kun kaivojen välinen etäisyys on L ja tehtiin yhden vuoden mittainen simulointi, saatiin $3L \times 2L$ alueella kuvan 4.8 verkolla yhden kaivon lämpötehoksi 1154 W ja $3,5L \times 2,5L$ alueella 1153 W. Kun pystysuunnassa verkon tiheys kaksinkertaistettiin, saatiin tehoksi 1152 W. Tulosten vaihtelu on siis viimeisessä numerossa eikä näin ollen merkityksellistä. Pystysuuntaisen verkon vaatimaan tiheyteen vaikuttaa luonnollisesti myös se, että työssä kallioperän lämpötilan oletettiin olevan alkuhetkeltä vakio, eikä geotermistä gradient-

tia huomioitu. Lämpötilajakaumankin kanssa pystysuuntainen lämpövirta on hyvin pientä vaakasuuntaiseen verrattuna.

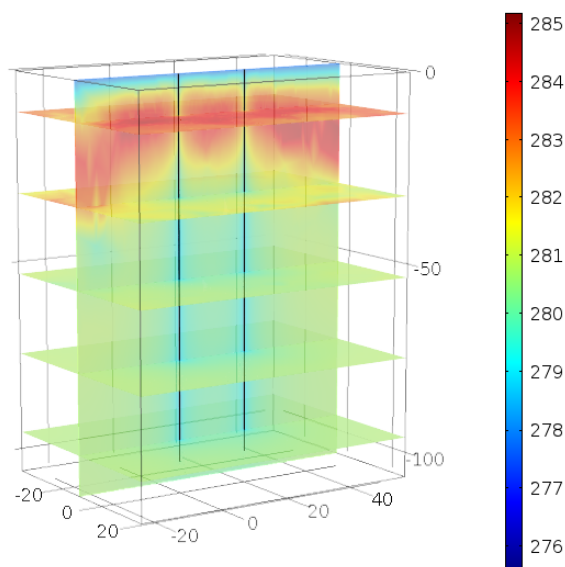
COMSOLissa on verkon luontiin ja muokkaamiseen erittäin hyvät työkalut ja elementeistä saa myös esimerkiksi suorakaiteen muotoisia. Nämä onnistuvat *Swept*- ja *Distribution*-toiminnoilla. Pitkissä simuloinneissa verkon taloudellisuuteen on syytä kiinnittää huomiota. Tämän työn tulosten laskennasta on taloudellisuus kaukana, mutta mallien vertailtavuuden vuoksi jokainen tapaus on laskettu samantapaisella verkolla. Koska työstä ei ollut tavoitteena saada täsmällisiä tuloksia jollekin tietylle tilanteelle, vaan tutkia COMSOLin tuomia mahdollisuuksia lämpökaivosimulointiin, ei verkon optimointia nähty tarpeelliseksi toimenpiteeksi.

4.6 Ratkaisija

Ratkaisijan oletusarvo (stationaari vai aikariippuva) on valittu jo alussa mallia luotaessa, mutta haluttaessa ratkaisijoita voidaan lisätä useita erilaisilla asetuksilla. Näin ei kuitenkaan välttämättä kannata suurissa simuloinneissa tehdä, koska tiedostojen koot kasvavat valtavan suuriksi (useita gigatavuja) jo yhden ratkaisun kanssa. Käyttäjän onkin syytä tallentaa kaikki mallit aina myös ilman tuloksia, jolloin mallin avaaminen ja parametrien tarkistaminen onnistuu nopeasti. Näin malleja on myös mahdollista tarvittaessa helppo siirtää tietokoneelta tai käyttäjältä toiselle.

Ajasta riippuvaan ratkaisijaan asetetaan haluttu simulointiaika ja aika-askeleen pituus. Erilaisia jaksoja voi laittaa useita peräkkäin. Tässä työssä Pipe Flow'n sisältävät simuloinnit on laskettu niin, että ensimmäinen vuorokausi lasketaan korkeintaan tunnin aika-askeleilla ja sen jälkeen askel on 6 tai 48 tuntia sen mukaan onko simulointiaika 1 vai 10 vuotta. Askel voi olla pitempikin, koska ratkaistavat diskreetit yhtälöryhmät ovat oletusarvoisesti implisiittisiä, ellei ratkaisutapaa muuteta ohjelmasta. Pipe Flow'n yhtälöiden ratkaisun löytymistä kuitenkin tuntui tämän työn simulaatioissa merkittävästi helpottavan alun tiheämpi tarkastelu. Ensimmäisen askeleen pituuden voi asettaa erikseen haluamakseen, mikä voi myös auttaa ratkaisun konvergoitumisessa.

Ratkaisijan asetuksista voidaan säätää numeeriseen ratkaisuun liittyvä ehtoja kuten sallitun laskentavirheen toleranssia, iteraatioiden maksimimäärää, relaksaatio-kertoimia ja iteraation lopetusehtoja. Eri fysiikoita ratkaistaan erillisinä ja niille voi säätää erilaiset ratkaisijan asetukset numeerisen ratkaisun osalta. Pipe Flow'n sisäl-



Kuva 4.9 Kahden kaivon systeemin ($L = 20$ m) lämpötilajakauma 10 vuoden simuloinnin jälkeen. Lämpötilan yksikkö on kelvin.

lyttäminen tehtävään kasvattaa laskenta-aikaa merkittävästi. Siksi laskentaverkon ja muiden asetusten säätämiseen tulisi kiinnittää huomiota. Pipe Flow'n kanssa käsiteltyjen tilanteiden laskenta-ajat olivat 30–90 minuuttia kuusiytimisellä i7-5820K suorittimella ja 16 Gt keskusmuistilla. Sylinterilähteillä lasketut pohjavesivirtauksen tarkastelut kestivät noin 5 minuuttia.

4.7 Jälkikäsittely

Tulosten esittämiseen ja jälkikäsittelyyn tulevat automaattisesti ratkaistavien fysiikkoiden sisältämät suureet. Erilaisia kuvaajia ja taulukoita on kuitenkin mahdollista luoda lähes rajattomasti. Lämpötilasta saa tasokuvaajia *Slice*-toiminnolla. Jotta raportti ei olisi kokonaan ilman hienoja värikuvia, on kuvassa 4.9 esitetty maaperän lämpötilakenttä 10 vuoden simulointiajan jälkeen 100 metriä syvälle kaivoparille, joiden etäisyys on 20 metriä. Kuvan perusteella lämpötilajakauma ei ole vielä siirtynyt laskenta-alueen kaikille reunoille. Kuvassa näkyvä kylmin alue on simuloidun U-putken pintaa.

Laskennan tuottamia tuloksia voi käyttää erilaisten lukuarvojen laskemiseen. Lämpökaivon tapauksessa tuotettu teho on kiinnostava suure ja se saadaan laskettua yhtälön (2.2) esimerkin mukaisesti. Kaiken numeerisen tiedon pystyy tallentamaan

tekstidokumenttiin, jolloin se saadaan esimerkiksi Exceliin käsittelyä varten. Työssä saatuja tuloksia käsitellään seuraavassa luvussa.

5. MALLINNUSTULOKSET

Tässä luvussa esitellään lämpökaivon tehoon ja lämmönsiirtonesteen lämpötilan laskentaan liittyvät tulokset. Työssä valittiin pääasiallisiksi tutkittaviksi suureiksi nämä kaksi, koska ne ovat konkreettisesti sidoksissa lämpökaivon mitoitus-tehoon. Työssä lasketut lämpökaivokentät ovat syvyydeltään vain 100–150 metriä, vaikka todelliset kaivot voivatkin olla merkittävästi syvempiä. Näihin syvyyksiin päädyttiin parista eri syystä. Työn taustalla ei ollut käytettävissä vertailuun mittausdataa pitkältä ajalta oikeasta lämpökaivosta, joten syvyydellä ei ollut täsmällistä merkitystä. Toiseksi laskennat muuttuivat kotitietokoneelle suhteellisen raskaiksi jo 150 metrin kaivoilla. Eräs tulos on laskettu 140 metrin kaivolla, koska 150 metrin kaivolla kyseisellä mallilla ohjelma ei verkotuksen ongelmien vuoksi saanut luotua tarvittavia matriiseja tehtävän ratkaisemiseksi. Kokeneempi käyttäjä olisi varmasti saanut tilanteen selvitettyä.

Simulaatioajoiksi valittiin 1 ja 10 vuotta, jotta nähdään, pystyykö simulaation avulla tarkastelemaan muutoksia pitkällä käyttöajalla. Simulaatioaika olisi voinut olla merkittävästi pitempikin, mutta jälleen laskennan pitkittämisen mielekkyys katoaa siihen, ettei laskennan tulosta voida mittauksista varmentaa. Lämmönsiirtonestettä virtaa kaivoon sisään jatkuvasti tilavuusvirralla $0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$. Tuloksia tarkasteltaessa on syytä pitää mielessä, että työssä oletetaan nesteen menevän sisään aina samassa lämpötilassa riippumatta ympäristön lämpötilasta. Simulaatioissa ei näin ollen myöskään oteta huomioon laitteiston automatiikkaa, joka pysäyttää lämpöpumpun välillä. Näistä oletuksista huolimatta tulosten perusteella voidaan tehdä päätelmiä lämpökaivojen käyttäytymisestä ja vähintäänkin simulaation tuomista mahdollisuuksista.

Maaperän alkulämpötilaksi asetettiin vakio $8 \text{ }^\circ\text{C}$. Tämä on Suomen kallioperään hieman korkea arvo, mutta tämä selittyy sillä, että lämmönsiirtonesteen sisäänmenolämpötilaksi asetettiin $2 \text{ }^\circ\text{C}$, jotta simuloinneissa voitiin välttää spekulatiot siitä, miten kaivossa tai maaperässä olevan veden jäätyminen vaikuttaisi. Todellisissa kai-

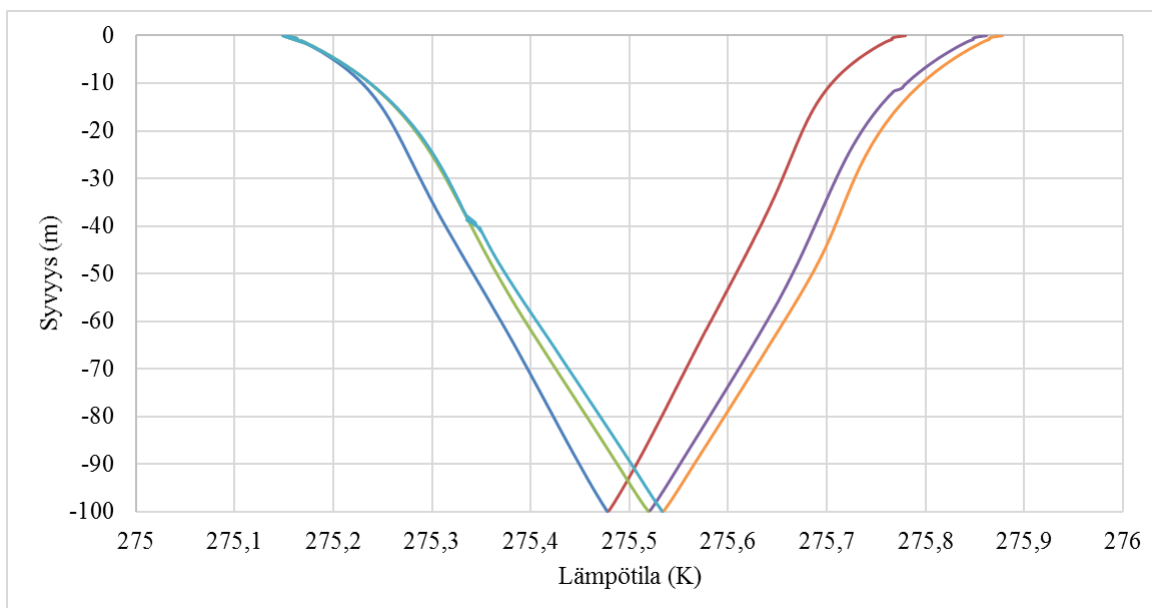
voissa lämmönsiirtonesteen keskilämpötila voi olla tuota suuruusluokkaa, eli neste tulee putkeen huomattavasti viileämpänä, jolloin myös saatava lämpöteho on suurempi. Hieman korkealla maan lämpötilalla saatiin lämpöä siirtymään U-putkeen. Olomuodon muutoksen simulointia vastaavalla tavalla yritettiin myös, mutta siitä saatiin vain alustavia tuloksia pienelle maamassalle, eikä näitä tuloksia pysty vertailemaan muihin. Lisäksi näissä testeissä lämpötilat U-putken sisäänmenossa ja kalliolla jouduttiin asettamaan väkisin niin pieniksi, että jäätyminen pystyttiin todentamaan. Jäätymisen mallintaminen vaatisi lämmönsiirtonesteen sisäänmenolämpötilan muuttumisen mallintamista. Kaivon osittaisen jäätymisen huomioiminen Pipe Flow -moduulin kanssa on kuitenkin mahdollista edellisessä luvussa esitetyllä tavalla aineominaisuuksien lämpötilariippuvuuden avulla.

Osa työn aikana saaduista tuloksista hävisi niiden tallennuksen ja tietokoneelta toiselle siirron yhteydessä. Esimerkki tästä on 140 m kaivoilla 20 m etäisyydellä tehty 10 vuoden simulaatio. Menetys ei kuitenkaan ollut suuri, koska samat päätelmät saadaan muiden simulaatioiden tuloksista. Ohjelman Pipe Flow -moduuliin oli käytössä lisenssi vain rajallisen ajan, joten hukattuja tuloksia ei pystytty luomaan uudestaan eikä tarkistuskierrosten tekeminen ollut mahdollista. Ohjelman tarjoamia simulointimahdollisuuksia saadaan kuitenkin tarkastelua tiedonsiirrosta selvinneiden tulosten avulla.

5.1 Lämmönsiirtonesteen lämpötila

Kuvassa 5.1 on esitetty lämmönsiirtonesteen lämpötila syvyyden funktiona vuoden simulointiajan jälkeen kolmella eri kaivon etäisyydellä 10, 15 ja 20 metriä kaivojen syvyyden ollessa 100 m. Laskenta on tehty kahden kaivon systeemille, mutta kaivot ja reunaehdot ovat täysin symmetriset, joten tulokset pätevät molemmille kaivoille. Etäisyyden kasvattamisella 10 metristä 15 metriin on selvä vaikutus nesteen ulostulolämpötilaan, mutta tämän jälkeen etäisyyden kasvattamisen merkitys pienenee. Tämä kertoo kaivojen kytkeytymisestä toisiinsa.

Kaivon syvyyden lisääminen kasvattaa lämmönsiirtonesteen lämpötilan muutosta, mutta edelleen on kuvasta 5.2, jossa on 10, 15 ja 20 m etäisyydellä lasketut lämpötilat 150 m syvälle kaivolle, havaittavissa lähekkäin olevien kaivojen vaikutus toisiinsa vuoden jälkeen. Kuvia 5.1 ja 5.2 verratessa on syytä huomata kuvaajien hieman poikkeava vaaka-akselin skaalaus. Lisäksi tuloksia tarkasteltaessa on hyvä muistaa, että kaivon tuottama lämpöteho on suoraan verrannollinen sisäänmenon ja ulostulon



Kuva 5.1 Lämmönsiirtonesteen lämpötila kaivon syvyyden funktiona 100 m kaivolle yhden vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyydet vasemmalta oikealla 10, 15 ja 20 m.

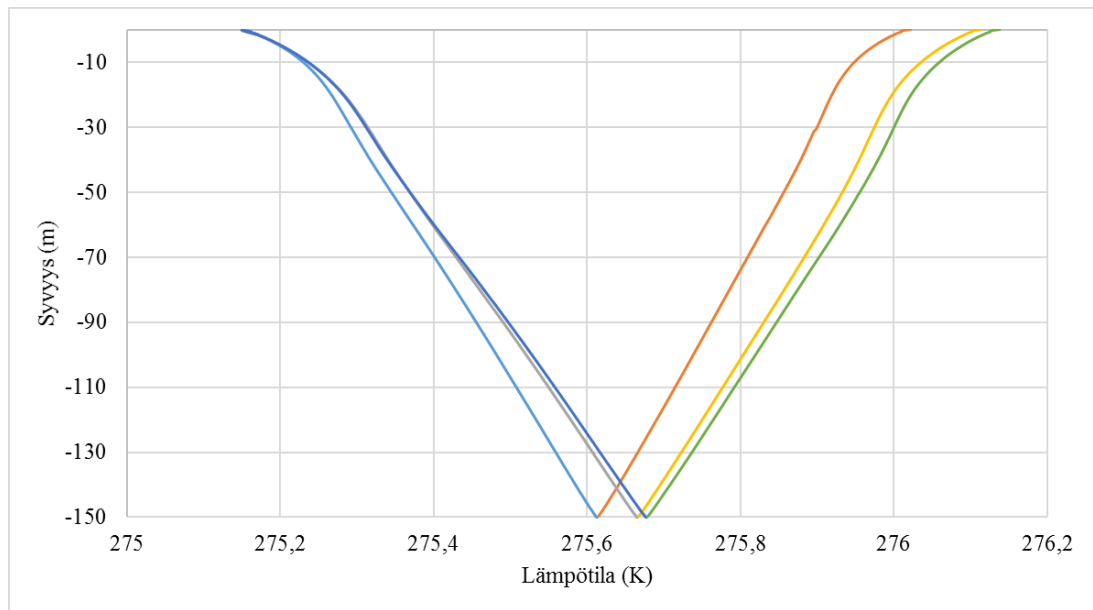
väliseen lämpötilaeroon.

Vertaamalla kuvia 5.1 ja 5.3 nähdään lämmönsiirtonesteen lämpötilan muutoksen pienenevän merkittävästi 1 ja 10 vuoden simulaatioaikojen välillä. Vertailun vuoksi 10 m etäisyydellä olevien kaivojen lämpötilat 1 ja 10 vuoden jälkeen on esitetty yhdessä kuvassa 5.4. Nesteen keskilämpötila laskee ajan kuluessa, mikä tämän työn simulaatiossa näkyy tehon laskuna. Kaivojen välisen etäisyyden vaikutus on edelleen mukana samanlaisena kuin lyhyemmissäkin simuloinneissa.

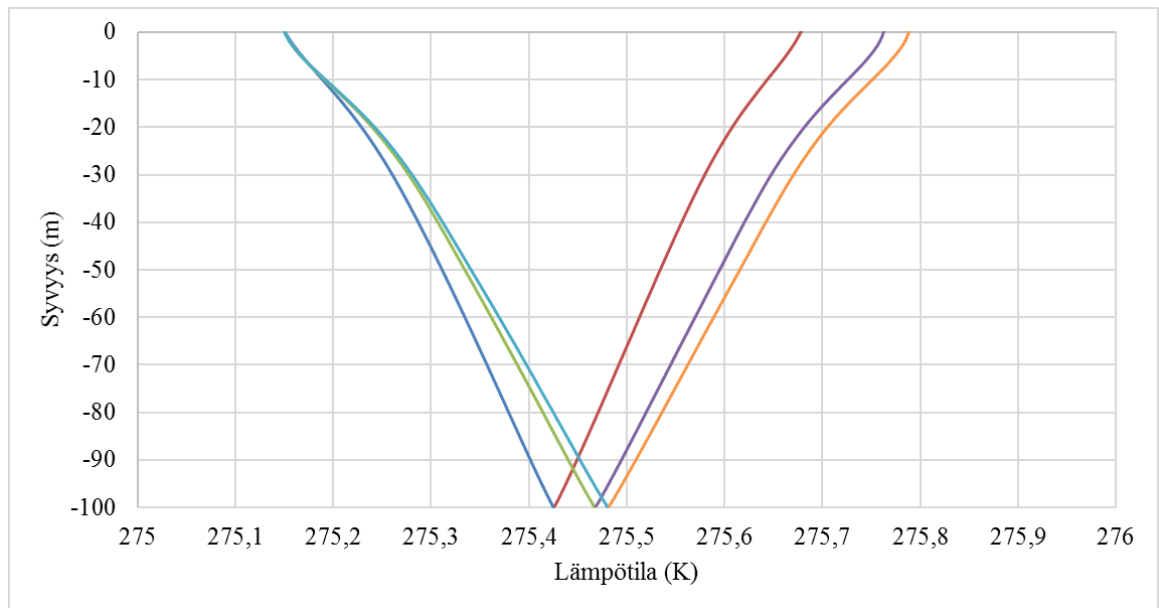
Viimeisenä lämpötilatuloksena esitetään kuvassa 5.5 140 metriä syvän kaivoparin, joiden etäisyys on 10 m, nesteen lämpötila 10 vuoden simulaation jälkeen. Vertaamalla tätä tulosta aiempiin kuvaajiin, nähdään jälleen, että pitkällä aikavälillä nesteen keskilämpötila laskee.

5.2 Lämpökaivon tuottama teho

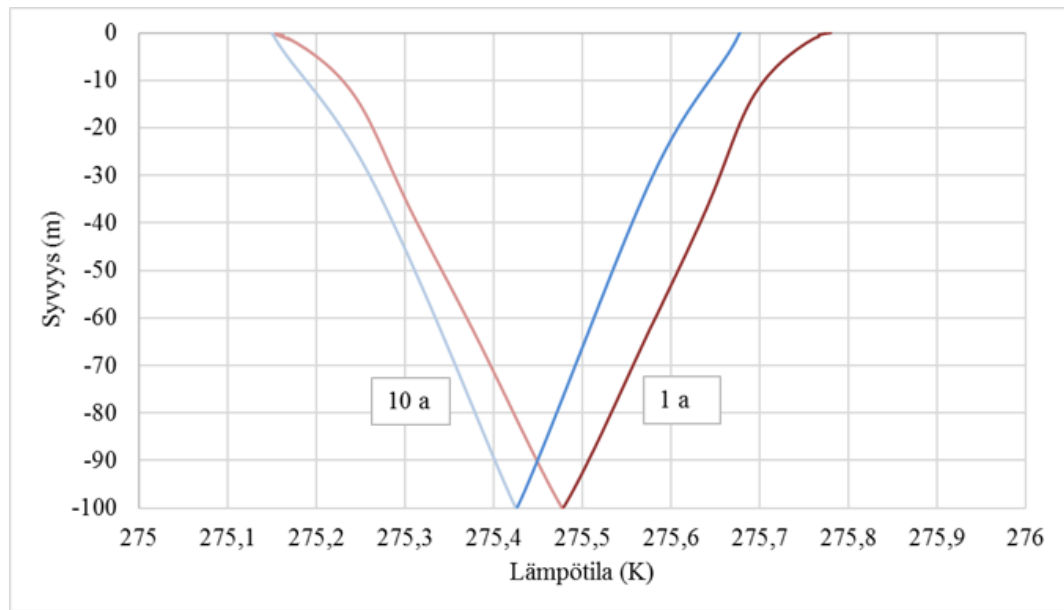
Lämpökaivon tuottaman tehon saa laskettua lämpötiloista, mutta havainnollisemman käsityksen tehosta saa piirtämällä sen simulointiajan funktiona. Kuvassa 5.6 on esitetty 100 m syvän kaivon tuottama teho eri kaivoparin etäisyyksillä ensimmäisen simulointivuoden aikana. On syytä korostaa, että kyseessä on nimenomaan yhden kaivon teho. Lähekkäin olevien kaivojen teho laskee hiljalleen, mutta kauempana



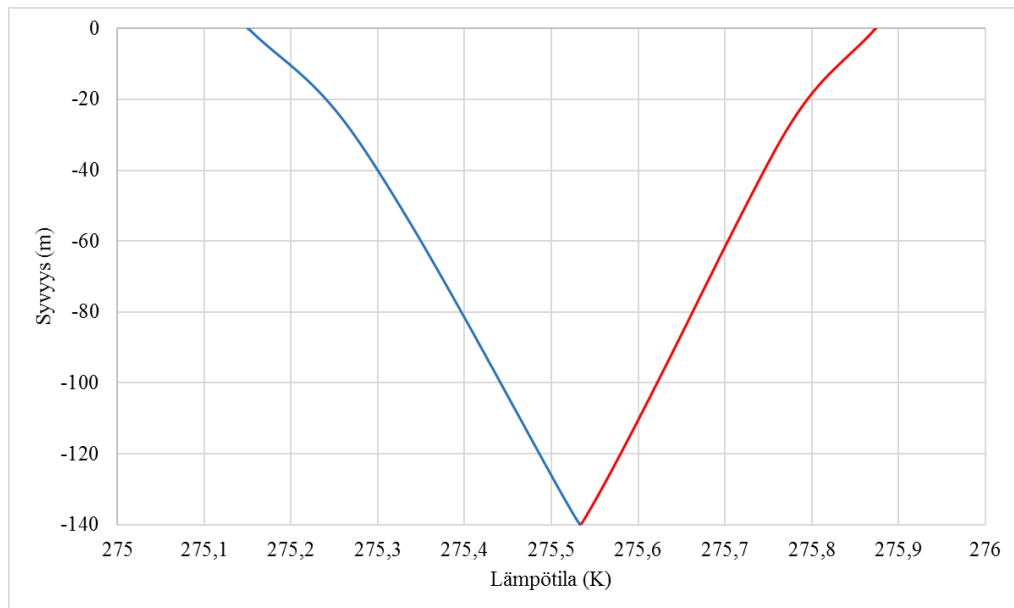
Kuva 5.2 Lämmönsiirtonesteen lämpötila syvyyden funktiona 150 m kaivolle yhden vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyydet vasemmalta oikealla 10, 15 ja 20 m.



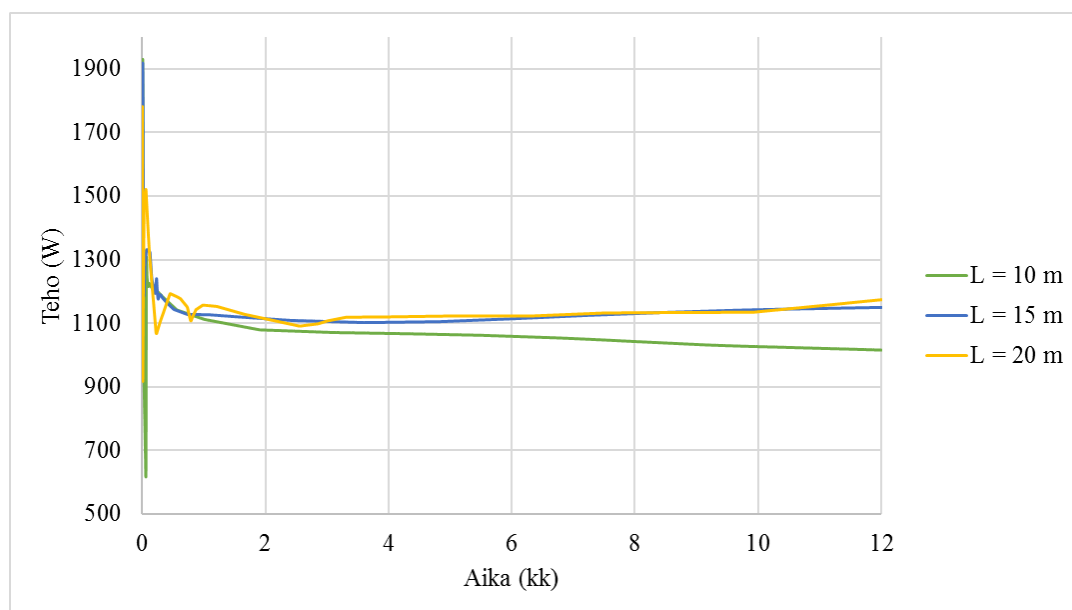
Kuva 5.3 Lämmönsiirtonesteen lämpötila kaivon syvyyden funktiona 100 m kaivolle 10 vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyydet vasemmalta oikealla 10, 15 ja 20 m.



Kuva 5.4 Lämmönsiirtonesteen lämpötilajakaumat yhden ja 10 vuoden jälkeen 100 m kaivoparissa 10 m etäisyydellä.



Kuva 5.5 Lämmönsiirtonesteen lämpötila kaivon syvyyden funktiona 140 m kaivolle 10 vuoden jälkeen. Kaivojen etäisyys on 10 m.

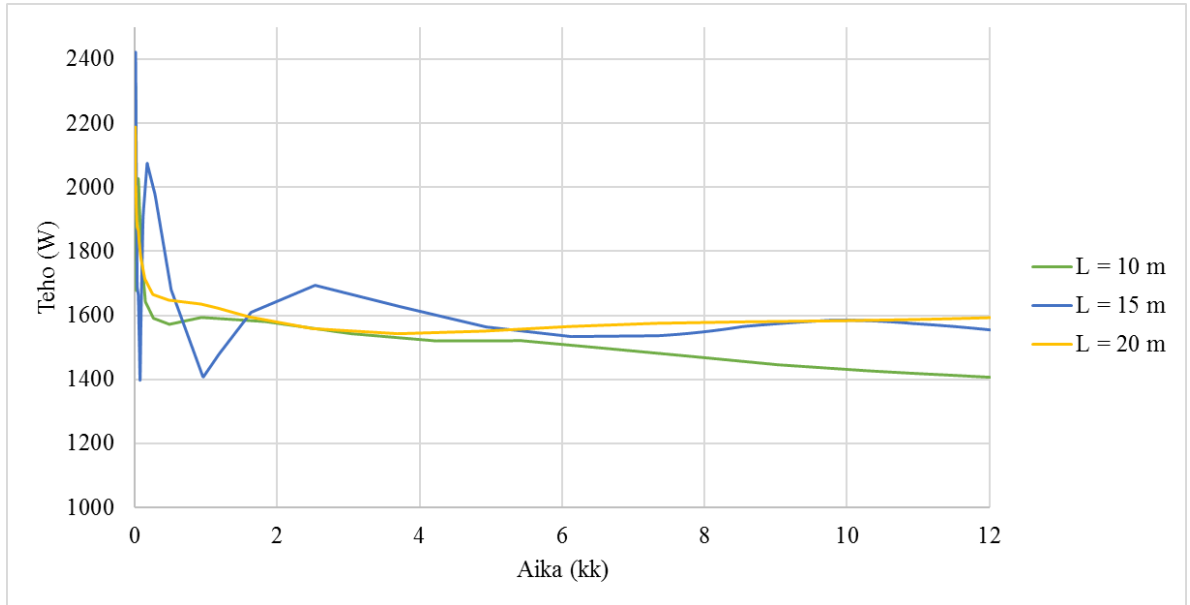


Kuva 5.6 Lämpökaivoparin (syvyys 100 m) yhden kaivon tuottama teho ensimmäisen vuoden aikana eri kaivojen etäisyyksillä.

olevien teho on melko tasaista tai jopa varovaisesti kasvavaa. Tehon pitkäaikaisesta käyttäytymisestä saa paremman käsityksen myöhemmin esitettävistä kuvaajista. Teho on suuruusluokkaa 1000 wattia, eli noin 10 W/m. Vuoden simulaatioajan jälkeen 10 m etäisyydellä olevien kaivojen teho on 1015 W, 15 m etäisyydellä 1150 W ja 20 m etäisyydellä 1174 W. Suhteellinen ero 15 ja 20 metrin etäisyyksillä on siis noin 2 %:a kun se 10 ja 20 m välillä on noin 15 %:a. Kaivojen etäisyyden kasvattamisen merkitys alkaa tämän perusteella pienentyä 15 metrin tienoilla.

Pintalämpötila on simulaation alussa 283 K ja kasvaa kolmen kuukauden aikana arvoon 293 K, josta se laskee kuudessa kuukaudessa 273:een K. Yksinkertaisemmin sanottuna 3. kuukauden kohdalla on keskikesä ja 9. kuukauden kohdalla sydäntalvi. Kuvan 5.6 perusteella pintalämpötilan vaihtelulla ei ole merkitystä simulointituloksen kannalta, koska lämpötehoissa ei tapahdu silminnähtäviä muutoksia pintalämpötilan muuttuessa.

Kaivon lämpövastuksen laskenta olisi tällä perusteella mahdollista, mikäli kaivon seinämän lämpötila tunnettaisiin. Tätä tietoa ei valitettavasti huomattu mallinnuksen aikana tallentaa erikseen, eikä sitä lämpötilaprofilien kuvista saa riittävällä tarkkuudella arvioitua. Saatua lämpöteho on kuitenkin järkevää suuruusluokkaa esimerkiksi Rosén et al. [21] antamiin tuloksiin verrattuna. Keskimääräinen lämpötilaero



Kuva 5.7 Lämpökaivoparin (syvyys 150 m) yhden kaivon tuottama teho ensimmäisen vuoden aikana eri kaivojen etäisyyksillä.

lämmönsiirtonesteen ja kaivon seinämän välillä pitäisi olla noin

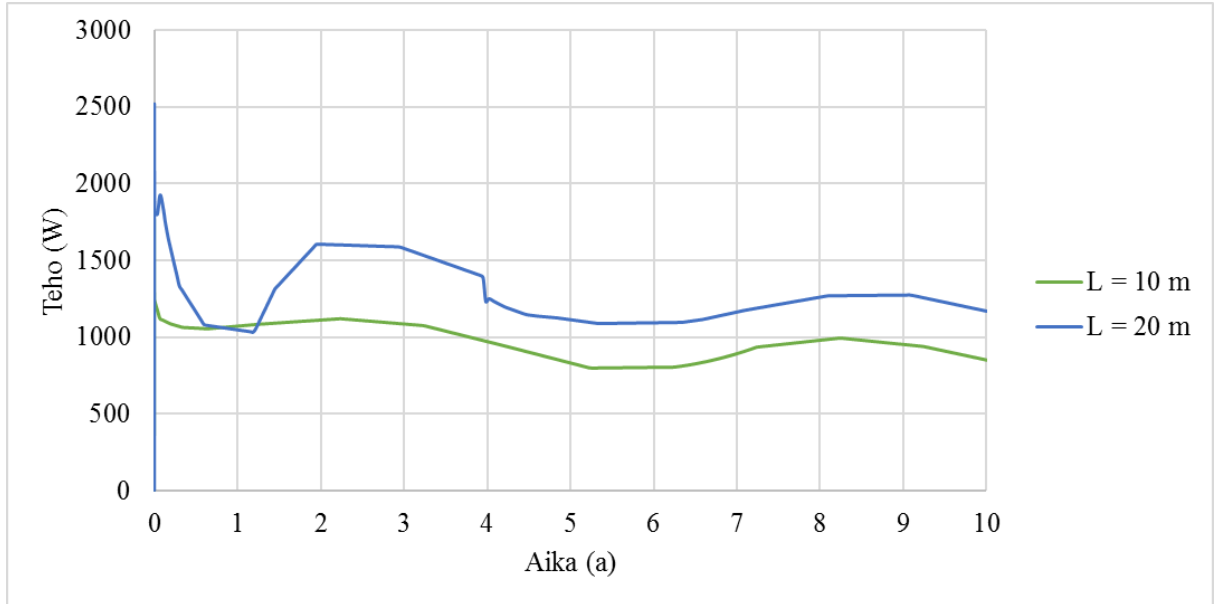
$$T_{\text{kaivo}} - T_{\text{neste}} = R \cdot q = 0,1 \text{ mK/W} \cdot 10 \text{ W/m} = 1 \text{ K}, \quad (5.1)$$

mikä tuntuu esimerkiksi kuvasta 4.9 silmämääräisesti arvioituna hyvinkin uskottavalta arvolta.

Vastaavasti 150 metrin kaivossa (kuva 5.7) saadaan ensimmäisen vuoden aikana hie-
man reilu 1500 watin teho, eli jälleen likimain 10 W/m, ja jälleen lähekkäin olevien
kaivojen teho laskee tasaisesti, kun kauempana olevien kaivojen tehot pysyvät tasai-
sempina. Suhteelliset erot eri etäisyyksillä ovat tässä tapauksessa 2 %:a (15 ja 20 m)
ja 13 %:a (10 ja 20 m). Kuvassa 5.7 15 metrin etäisyydellä olevien kaivojen tehossa
näkyvät ensimmäisen parin kuukauden aikana vaihtelevaa käyttäytymistä, jonka täy-
tyy johtua numeerisen ratkaisun poukkoilusta. Teho on ensin suurin, laskee nopeasti
alas, pomppaa taas ylös ja pienen kuopan jälkeen asettuu seurailemaan muita käyriä.
Luonnollisesti simulaatioiden alkuvaiheiden perusteella ei kannata tehdä päätelmiä
kaivon toiminnasta.

Pitkän aikavälin laskennasta esimerkkeinä ovat kuvat 5.8 ja 5.9, joista jälkim-
mäisessä simulointiaika on 6 vuotta. Ensimmäisessä kuvassa 20 metrin etäisyydellä
olevien kaivojen tehossa on erikoinen monttu, jolle ainakaan tämän työn tekijä ei

keksi mitään fysikaalista selitystä, vaan monttu johtuu todennäköisesti ratkaisun satunnaisesta käyttäytymisestä. Erikoista on myös tehon aaltoilu vuosien kuluessa. Lähekkäin olevien kaivojen teho on pienoissa ristiriidassa kuvan 5.7 lukuarvojen kanssa, koska kaivo ei tuotakaan enää noin 10 W/m vaan vain likimain 7 W/m. Kauempana olevien kaivojen antama teho kuitenkin vastaa edellisiä tuloksia.



Kuva 5.8 Lämpökaivoparin (syvyys 140 m) yhden kaivon tuottama teho 10 vuoden aikana kahdella eri etäisyydellä.

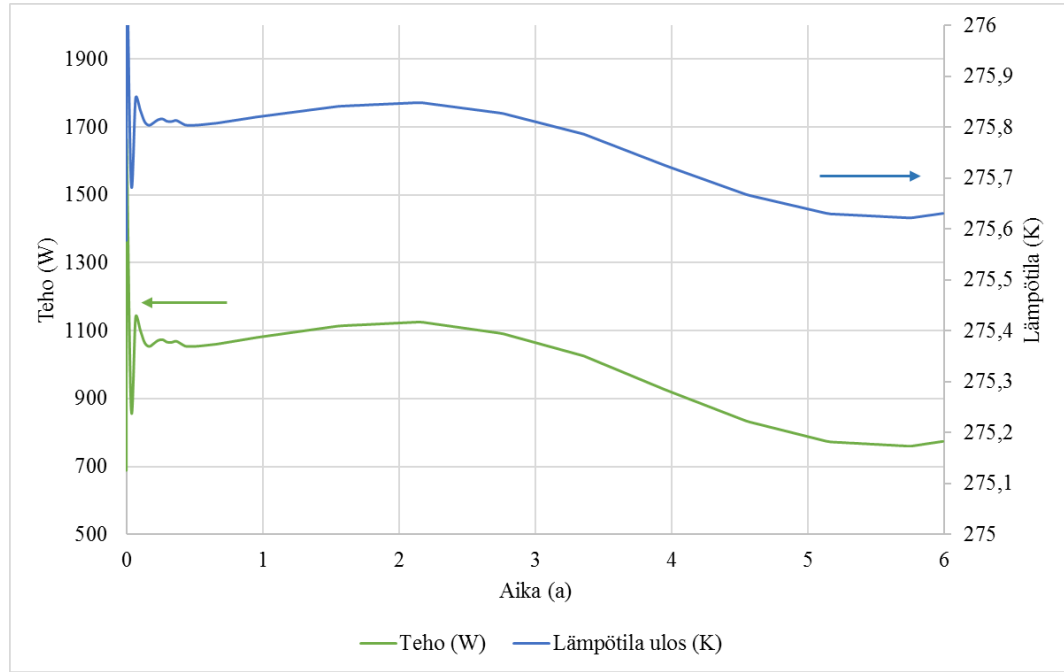
Kuva 5.9 havainnollistaa vielä lämmönsiirtonesteen ulostulolämpötilan ja kaivosta saatavan lämpötehon välistä riippuvuutta. Neste menee kaivoon lämpötilassa 2 °C.

5.3 Lämmönsiirtokerroin

COMSOLista on mahdollista tulostaa erilaisia laskennan aikana ohjelman sisällä laskettuja lukuja. 150 m kaivolle etsittiin ohjelman laskema Nusseltin luku U-putken sisäpinnalle alaspäin menevälle virtaukselle, luvun arvo oli melko tasaisesti simuloinnin loppupuolella 13. Näin ollen lämmönsiirtokerroin sisäpinnalla olisi

$$h_s = \frac{Nu \cdot k_L}{d_s} = \frac{13 \cdot 0,39 \text{ W/mK}}{35,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 145 \text{ W/m}^2\text{K}. \quad (5.2)$$

Acuña ja Palm [11] ilmoittavat TRT-mittauksien perusteella saaduiksi sisäpuolisiksi lämmönsiirtokertoimiksi ylöspäin 1162 ja alaspäin 1242 W/(m²K). Näitä arvoja



Kuva 5.9 Lämmönsiirtonesteen ulostulolämpötila ja yhden kaivon teho 100 m syville kaivoille 10 m etäisyydellä ensimmäisen kuuden vuoden aikana.

käyttämällä on COMSOLilla laskettu kokonaislämpövirran tiheydet erilaisilla U-putken haarojen asettelulla välille 18–30 W/m. Tämän työn ja Acuña ja Palmin tutkimuksen tulosten merkittävä ero lämmönsiirtokertoimissa tuntuu uskomattomalta, kun lämpöteho pituusyksikköä kohti on kuitenkin samaa suuruusluokkaa. Viitatussa simulaatiossa lämpötilaerot putken ja häiritsemättömän ympäristön välillä ovat noin 7 K ja aineominaisuudet kalliolle, vedelle ja muoviputkelle ovat käytännössä samat, kuin mitä tässä työssä on käytetty. Acuña antaa väitöskirjassaan [34] 0,5 dm³/s virtaukselle sisäpuoliselle lämmönsiirtokertoimelle arvoksi 1400–1500 W/(m²K).

Taulukon 4.1 arvojen perusteella lämmönsiirtonesteen terminen diffusiviteetti on (kaava (3.19))

$$\alpha = \frac{0,39 \text{ W/mK}}{1068 \text{ kg/m}^3 \cdot 3340 \text{ J/kgK}} = 1,093 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (5.3)$$

Prandtlin luku on kaavan (3.18) perusteella

$$Pr = \frac{11,65 \cdot 10^{-6}}{1,093 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}} = 106,6. \quad (5.4)$$

Mikäli konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen pitäisi U-putken sisäpinnalla olla noin $1200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, pitäisi puolestaan Nusseltin luvun olla

$$Nu = \frac{0,0352 \text{ m} \cdot 1200 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}}{0,39 \text{ W}/\text{mK}} = 108,3. \quad (5.5)$$

Näiden Prandtin ja Nusseltin lukujen arvojen avulla voidaan Gnielinskin korrelaation (kaava (3.20)) avulla ratkaista Reynoldsin luku ja laskea mikä pitäisi tilavuusvirran olla, jotta lämmönsiirtokerroin olisi tuo $1200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Reynoldsin luvun yhtälöksi saadaan

$$Re = \frac{Nu \cdot (1 + 12,7(f_D/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1))}{Pr \cdot f_D/8} + 1000. \quad (5.6)$$

Yhtälö on ratkaistava iteratiivisesti, koska kitkakerroin f_D riippuu Reynoldsin luvusta.

Jos kitkakertoimeksi arvataan 0,04, saadaan Reynoldsin luvuksi Gnielinskin kaavasta

$$Re = \frac{108,3 \cdot (1 + 12,7(0,04/8)^{1/2}(106,6^{2/3} - 1))}{106,6 \cdot 0,04/8} + 1000 = 5130. \quad (5.7)$$

Churchillin korrelaation (kaava (3.8)) avulla saadaan tällä Reynoldsin luvulla kitkakertoimeksi noin 0,037, jolla jälleen saadaan Reynoldsin luvuksi noin 5290. Keskimääräisen virtausnopeuden pitäisi tällöin olla

$$u = \frac{Re \cdot \nu}{d} = \frac{5290 \cdot 11,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{0,0352 \text{ m}} = 1,75 \text{ m/s}, \quad (5.8)$$

mikä tarkoittaisi tilavuusvirtana arvoa

$$\dot{V} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot u = \frac{\pi \cdot (0,0352 \text{ m})^2}{4} \cdot 1,75 \text{ m/s} = 0,0017 \text{ m}^3/\text{s}, \quad (5.9)$$

eli noin $1,7 \text{ dm}^3/\text{s}$. Acuñaan antamat lämmönsiirtokertoimen arvot tuntuvat tällä perusteella varsin suurilta.

Toisaalta erikoista on myös se, että tässä työssä käytetyillä putken mitoilla ja tilavuusvirran arvolla Reynoldsin luvuksi tulee noin 1550, eli virtaus olisi laminaarinen, mutta tästä huolimatta COMSOL näyttää laskevan Nusseltin luvun Gnielinskin korrelaatiosta, eikä käytä täysin kehittyneen laminaarin virtauksen Nusseltin lukua. Työssä käytetyillä arvoilla Nusseltin luvuksi tulee noin 15. Edellä esitetty arvo 13

on ohjelman usean iteraatiokierroksen jälkeen saama tulos. Pipe Flow -moduulin toimintaa olisi syytä tarkastella lähemmin joidenkin tunnettujen tilanteiden kautta.

5.4 Pohjavesivirtauksen vaikutus

Pohjavesivirtauksen vaikutusta maaperän lämpökenttään ei laskettu Pipe Flow'n kanssa, vaan tässä laskennassa kaivo on mallinnettu sylinterinieluna. Mallissa on kalliossa sylinterinmuotoinen alue vettä, jossa on keskellä lämmönsiirtoputkea kuvaava sylinteri, jonka pinnasta menee vakio lämpövirran tiheys sisään. Lämpövirran tiheys on 10 W/m.

Akviferin paksuudeksi on valittu 20 metriä ja akviferin yläpinta on 40 metriä maanpinnan alapuolella. Kuvat 5.10, 5.11 ja 5.12 esittävät lämpötilajakaumaa 50 metrin syvyydellä pinnasta akviferin keskellä. Simulaatioita tehtiin useilla erilaisilla parametreilla, mutta tähän raporttiin valittiin kolme havainnollisinta tulosta. Kaikissa esitetyissä tuloksissa kaivojen etäisyys on 20 metriä ja niissä on muutettu kallion vedenläpäisevyyttä K ja hydraulista gradienttia. Kuvissa on kaikissa sama lämpötilan väriskaalaus vertailtavuuden vuoksi.

Kallion lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti ovat samoja kuin edellisissä simulaatioissa. Graniitin huokoisuus on lähteen [24] mukaisesti 0,1, ja vedenläpäisevyyden arvoina on käytetty arvoja saman lähteen antamalta väliltä. Kuvassa 5.10 on laskettu lämpötilakenttä melko suurella vedenläpäisevyyden arvolla $K = 3 \cdot 10^{-4}$ m/s ja hydraulisella gradientilla 0,1 m/80 m, mikä vastaa likimain luvussa 3 hydrauliselle gradientille esitetyn välin alapäättä, jolloin kaavan (3.24) mukaan pohjaveden virtausnopeus on

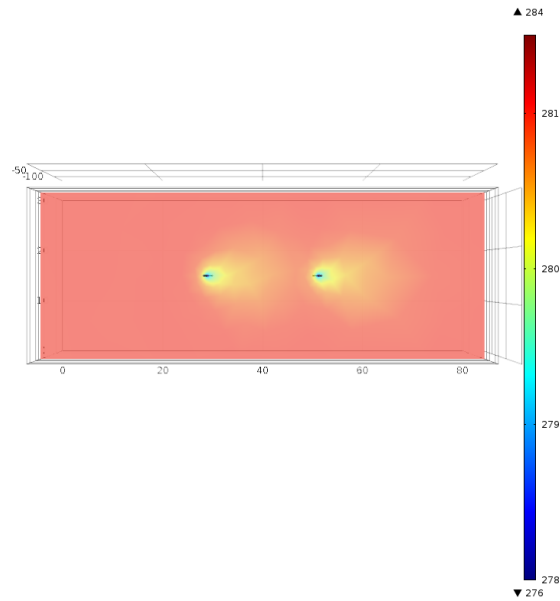
$$q_V = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \cdot \frac{0,1 \text{ m}}{80 \text{ m}} = 3,75 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}. \quad (5.10)$$

Eskilsonin [31] esittämän kaavan (3.30) perusteella saadaan Péclet'n luvuksi

$$Pe = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4200 \text{ J/kgK} \cdot 3,75 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \cdot 100 \text{ m}}{2 \cdot 3 \text{ W/mK}} = 26. \quad (5.11)$$

Näiden lukuarvojen mukainen tilanne on esitetty kuvassa 5.10, jossa simulointiaika on yksi vuosi. Pohjavesi virtaa kuvassa vasemmalta oikealle ja kuvasta näkyy kaivojen takana maan lämpötilan laskeminen. Ensimmäisen kaivon kohdalla jäähtyvä pohjavesi mahdollisesti jäähdyttää toisen kaivon ympäristöä. Pohjaveden vaikutus

kaivojen toimintaan on varmasti mahdollinen pitkällä aikavälillä.



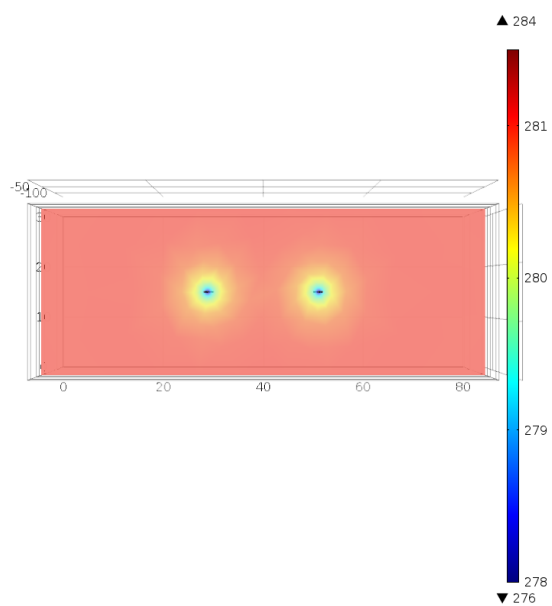
Kuva 5.10 Vedenläpäisevyys $3 \cdot 10^{-4}$ m/s ja hydraulinen gradientti 0,00125, $Pe \approx 26$.

Kuvassa 5.11 on esitetty sama yhden vuoden simulointitilanne, mutta vedenläpäisevyyden arvolla $K = 3 \cdot 10^{-8}$ m/s, jolloin Péclet'n luvuksi saadaan 0,0026. Lämpötilakenttä kaivojen ympärillä on symmetrinen, eivätkä kaivot näytä erityisesti kytkeytyvän toisiinsa. Tilanne kaivojen ympärillä on hyvin samankaltainen kuin malleissa, joissa pohjaveden virtausta ei ole huomioitu (vrt. kuva 5.14).

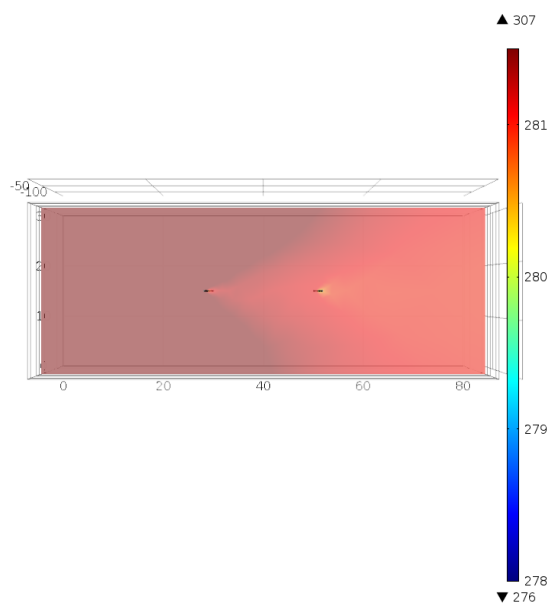
Kuvassa 5.12 on vastaava tilanne kuin ensimmäisessä tapauksessa (kuva 5.10), mutta hydraulisella gradientilla 1 m/80 m, mikä on pohjoismaisen peruskallion tapauksessa yläraja [26]. Kaivojen välillä on kytkentä, mutta nyt lämpötilakenttä on huomattavan tasainen, eikä edellisten tapausten näköistä jäähtymistä kaivojen ympärillä tapahdu. Pohjavesi näyttäisi siis tuovan kaivojen lähelle lisää lämpöä. Tämä on tietysti äärimmäinen tilanne, mutta osoittaa sen, ettei pohjaveden vaikutus lämpökaivokenttään ole yksinkertainen asia, vaan vaatii paremman selvityksen kuin tässä työssä pystytään tuottamaan. Joka tapauksessa pohjavesitilanne on tunnettava hyvin, jotta sitä voi yrittää mallintaa järkevästi.

5.5 Muita näkökulmia mallinnukseen

Kaikissa tämän luvun simuloinneissa on oletettu, että nestettä virtaa koko ajan kaivon vakio- ΔT -lämpötilassa tai että kaivon ottama teho on muuten vakio. Vastaavat



Kuva 5.11 Vedenläpäisevyys $3 \cdot 10^{-8}$ m/s ja hydraulinen gradientti 0,00125, $Pe \approx 0,0026$.



Kuva 5.12 Vedenläpäisevyys $3 \cdot 10^{-4}$ m/s ja hydraulinen gradientti 0,0125, $Pe \approx 260$.

simulaatiot on COMSOLissa mahdollista toteuttaa myös niin, että nesteen virtaus välillä pysäytetään tai esimerkiksi lämpötilaa muutetaan. On myös mahdollista luoda laskentaan ehto, jossa lämpöä otetaan vain niin kauan, kunnes joku haluttu lämpö määrä on saatu, minkä jälkeen virtaus pysäytetään. Sisäänmenevän nesteen lämpötila olisi mahdollista sitoa ulostulolämpötilaan siten, että lämpötila laskee aina jonkin vakiotehon mukaisesti. Tällaiseen laskentaan ei tässä työssä lähdetty, koska simuloitavissa tapauksia oli jo nyt haastetta suhteellisen runsaasti.

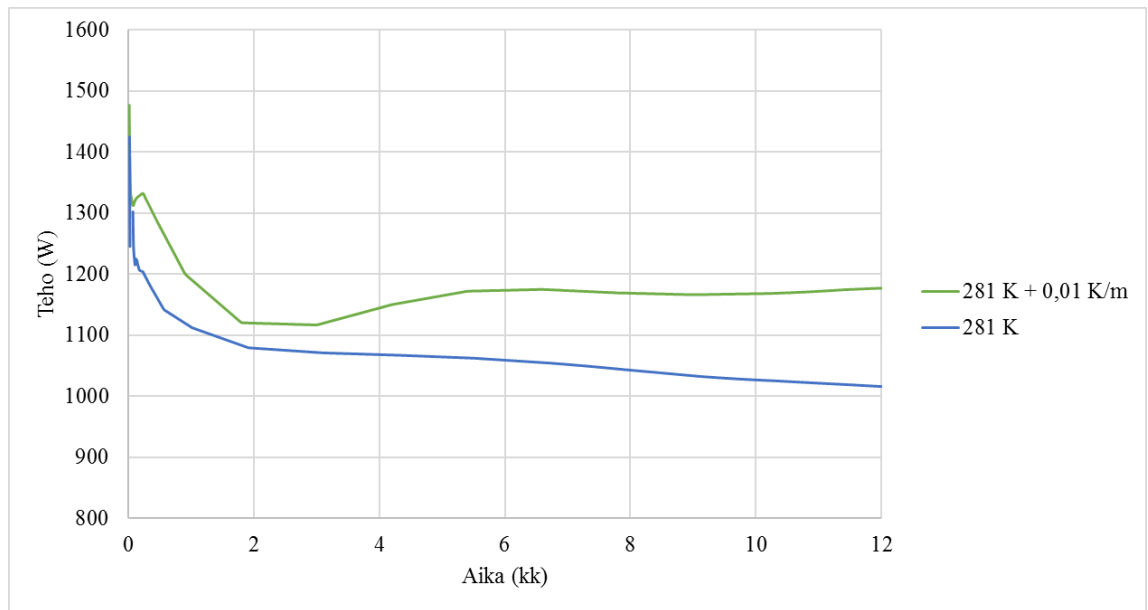
Työn alkuvaiheessa valittiin malliin lähtötilanne, jossa maaperä on vakiolämpötilassa. Työn aikana kuitenkin testattiin yhteen malliin, mikä vaikutus maaperän lämpötilan muutoksella syvyysuunnassa on. Lämpötila nousee Suomen maaperässä noin yhden asteen 100 metriä kohti. Tämä on helppo asettaa lämmönsiirtomoduulin alkuehtoon yhtälönä

$$T_{\text{ext}} = 281[\text{K}] - (0,01[\text{K/m}] \cdot z). \quad (5.12)$$

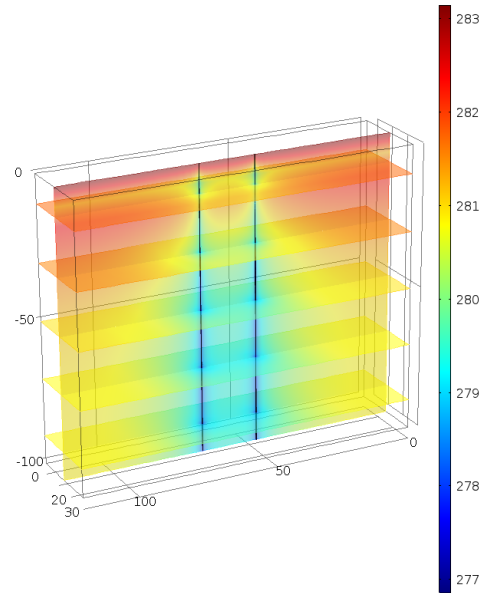
Edellä olevassa yhtälössä oletetaan, että kaivo mallinnetaan koordinaatistossa negatiivisen z-akselin suuntaan, jolloin z-koordinaatti saa negatiivisia arvoja. Laskenta tehtiin 100 m kaivoparille 10 m etäisyydellä ja yhden vuoden simulointiajalle, ja tulos on esitetty kuvassa 5.13. Lämpötilajakauman merkitys maaperässä näyttää olevan kohtuullisen suuri, jopa noin 20 %:a, tosin sillä oletuksella, että vakioarvona käytettäisiin pintalämpötilaa. Lämpötilajakauma on kuitenkin erittäin helppo ottaa huomioon, ja se olisi syytä tehdä lämmönsiirron todenmukaisen laskemisen vuoksi.

Jos tavoitteena on tarkastella vain maaperän lämpötilakenttää, voi laskennan tehdä tehokkaasti sylinterilähteitä käyttäen. Kuvassa 5.14 on esitetty yksi tällaisen simulaation tulos. Sylinterilähteinä mallintamalla kaivokentistä voi tehdä erittäinkin laajoja.

Työn yhtenä osana yritettiin mallintaa maalämpökaivokentän regenerointia. Regeneroinnilla tarkoitetaan sitä, että lämmityskauden ulkopuolella maahan viedään lämpöä ja samalla jäähdytetään jotain tilaa. Simulointi periaatteen tasolla onnistuikin. Simulointiaika oli 6 vuotta ja mallissa aina vuodesta kaksi kuukautta kaivossa kiertettiin lämmintä nestettä, joka jäähdyi putken matkalla. Lämpötila kirjoitettiin COMSOLiin ajan funktiona yksinkertaisena taulukkona, josta ohjelma interpoloi nesteen sisäänmenolämpötilan kulloisellakin aika-askeleella. Tilavuusvirta pidettiin samana. Tulosta ei tässä esitetä, koska siitä on mahdollista saada äkkiä täysin väärä käsitys regeneraation toiminnasta. Sillä oletuksella, että jäähdytettävän tilan lämpötila on noin 20 °C, voi lämmönsiirtonesteen lämpötila olla noin 15–17 °C. Rege-



Kuva 5.13 Lämpökaivoparin yhden kaivon teho 100 m syvälle kaivolle 10 m etäisyydellä, kun lämpötilagradientti maaperässä otetaan huomioon.



Kuva 5.14 Maaperän lämpötila 100 m syvälle kaivoparille 20 metrin etäisyydellä 10 vuoden jälkeen. Kaivot ovat sylinterinieleuja.

neraatiota ei voi mallintaa tämän työn vakiovirtaamalla, koska tällöin yhteen kaivoon viedään lämpöä lähes 20 kW:n teholla. Kun tätä jatketaan muutama kesä, on maassa niin lämmintä, että vastaavasti lämmityskaudella lämpöpumpulla saatavat tehot nousevat moninkertaisiksi, kun oletetaan nesteen sisäänmenoon vakiolämpötila. Simulointi on mahdollista, mutta vaatii täsmällisemmän mallin kuin tämän työn aikana on ehditty rakentaa.

Regeneraation simulointi ja mallinnus pitäisi sitoa johonkin jaksollisesti toimivaan jäähdytykseen, jossa nesteen lämpötila olisi kuitenkin edellä mainittua suuruusluokkaa. Pienemmällä lämpötilalla simulaatiota ei voi tehdä, koska tällöin neste ei välttämättä jäähdy kaivossa, jolloin sinne ei tietysti myöskään siirry tehoa. Tällaisen jaksollisen funktion luominen pitäisi olla kohtuullisella vaivalla toteutettavissa. Samoin on mahdollista luoda COMSOLIin ehto, jossa nestettä ajetaan kaivoon niin kauan, kunnes tietty lämpöenergia on siirretty. Yleiskäsityksen regeneraation simuloinnista saa Li et al. artikkelista [35].

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää COMSOL Multiphysics 5.2 -ohjelman ominaisuuksia lämpökaivojen ja lämpökaivokenttien simuloinnissa. Erityisesti työssä on perehdytty Pipe Flow -moduuliin, jonka avulla putkivirtaus lämmönsiirto huomioonottaen voidaan laskea yksiulotteisena, vaikka muu laskenta-alue käsitellään kolmiulotteisena. Simulaatioiden lähtökohdaksi otettiin se, että lämmönsiirtoneste menee kaivoon U-putken toisesta haarasta lämpötilassa $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tilavuusvirralla $0,5\text{ dm}^3/\text{s}$, ja simuloimalla laskettiin, miten paljon neste lämpenee kaivossa kiertäessään. Tästä saatiin laskettua kaivosta saatava lämpöteho, joka kytkettiin lämmönsiirron yhtälöillä kaivon ja ympäröivän kallion lämpötilaan, joka oli simulaatioiden alussa vakio $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vuodenaikojen vaihtelu otettiin huomioon jaksollisella pintalämpötilalla, joka vaihteli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä vuoden mittaisella jaksolla. Pintalämpötilan vaihtelulla ei kuitenkaan ole tulosten perusteella vaikutusta. Simulointiaikana käytettiin 1 ja 10 vuoden ja yhdessä tapauksessa 6 vuoden mittaisia jaksoja, joilla tutkittiin, miten kaivojen välinen etäisyys ja kaivojen syvyys vaikutti lämmönsiirtonesteen lämpötilaan ja siten saatavaan lämpötehoon. Työssä laskettiin vain kahden kaivon tapauksia etäisyyksillä 10, 15 ja 20 metriä ja syvyyksillä 100 ja 150 metriä. Syvyyttä olisi voinut kasvattaa, mutta laskenta saatiin toimimaan ensimmäisenä 100 metrin kaivoilla, ja koska tarkoitus oli pääasiassa tutkia ohjelman toimintoja, tehtiin laskennat loppuun asti näillä hieman matalilla kaivoilla.

Odotetusti pitkällä aikavälillä kaivojen välinen etäisyys vaikutti kaivosta saatavaan tehoon. Lämpöteho oli pienin 10 metrin etäisyydellä ja suureni kaivojen etäisyyden kasvaessa. Ero 10 ja 15 metrin välillä on kuitenkin suurempi kuin 15 ja 20 metrin välillä, joille ei vuoden mittaisissa simuloinneissa saatu kaikissa tapauksissa oikeastaan mitään eroja. Kun simulointiaika kasvatettiin 10 vuoteen, oli kaivojen eri etäisyyksien vaikutus selvemmin nähtävissä. Kaivojen syvyys vaikuttaa luonnollisesti kaivosta saatavaan lämpötehoon, koska lämmönsiirtonesteen lämpötila ehtii kasvaa sitä enemmän mitä syvempi kaivo on.

Putken sisäpuoliselle lämmönsiirtokertoimelle saatiin kirjallisuuteen verrattuna risiriitaisia tuloksia. Työssä laskettu lämmönsiirtokerroin on noin $145 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kun sille kirjallisuudessa esitetään lähes kymmenkertaisia arvoja. Laskettu lämpöteho kaivon pituusyksikköä kohti vastaa kuitenkin suhteellisen hyvin kirjallisuudessa esitettyjä arvoja.

Työssä simuloitiin pohjavesivirtauksen vaikutusta lämpökaivokentän lämpötilajakaumaan yhdistämällä lämmönsiirron laskentaan Darcyn laki, johon syötettiin vedenläpäisevyyden ja hydraulisen gradientin arvoiksi Pohjoismaiden peruskalliolle tyypillisten arvojen ääripäitä. Pohjavesivirtauksen oletettiin tapahtuvan 20 m paksussa kerroksessa 40 m maanpinnan alapuolella. Kallion huokoisuutena käytettiin arvoa 0,1. Pohjavesisimulaatioissa lämpökaivoa mallinnettiin sylinterimäisenä lämpönieluna, jossa lämpövirran tiheys on $10 \text{ W}/\text{m}$. Kaivojen syvyys oli 100 m ja etäisyys 20 m. Tuloksina laskettiin lämpötilajakauma kallioperässä vuoden simulointiajan jälkeen. Pohjavesivirtauksella voi olla merkittävä vaikutus lämpötilakenttään kaivojen välissä, mutta virtausnopeuden pitää olla varsin suuri. Pohjaveden vaikutuksen merkittävyyttä voi simulaatioiden perusteella arvioida dimensiottomalla Péclet'n luvulla, jonka lukuarvon ollessa pienempi kuin 1, ei pohjavesi näytä vaikuttavan lämpötilakenttään merkittäväällä tavalla. Kuitenkaan Péclet'n luvun ollessa suurempi kuin 1 ei voi suoraan sanoa miten pohjavesi vaikuttaa kaivojen toimintaan, koska mallien perusteella se saattaa joko heikentää tai parantaa kaivojen tuottoa.

6.1 Pohdinta

Työssä pyrittiin selvittämään ja kokeilemaan COMSOL Multiphysics -ohjelman ominaisuuksia maalämpökenttien simuloinnissa. Työssä ei saatu kaikkia mahdollisia tuloksia laskettua niin, että niistä voisi tehdä jotain täsmällisiä päätelmiä kaivokenttien mitoittamiseen, mutta lasketut lämmönsiirtonesteen lämpötilan ja kaivon lämpötehon arvot antavat hyvän kuvan siitä, mihin ohjelmalla pystyy, joten työtä voidaan pitää onnistuneena. Ohjelman monenlaiset fysiikat ja muut laskentatyökalut mahdollistavat käytännössä kaiken kiinnostavan mallintamisen. Erityisesti Pipe Flow tarjoaa paljon mahdollisuuksia kaikenlaisten putkivirtausten lämmönsiirron mallinnukseen. Haaste onkin lähinnä siinä, miten vaihtelevat olosuhteet ja esimerkiksi automaatiojärjestelmien toiminta ohjelmoidaan mukaan malleihin, jotta simulaatio saadaan vastaamaan todellisen järjestelmän toimintaa. Toinen haaste on mallien optimointi niin, että laskennat pystyy suorittamaan järjellisessä ajassa. Tällöin ohjelmasta voisi olla aidosti hyötyä lämpökaivokenttien mitoituksessa. Kun yhden toimivan mallin

saa luotua, on siihen ominaisuuksien muuttaminen suhteellisen suoraviivaista.

Tämän työn osalta suurin puute on se, että tulokset ovat todella vain simulaation tuottamia, eikä niille ole saatavilla pitkän aikavälin mittausdataa, johon tuloksia voisi verrata. Työn alkuvaiheessa ei ollut selvää, että Pipe Flow -moduuli saataisiin käyttöön, joten kun tuo kyseinen lisäosa saatiin ohjelmaan, muuttui työn suunta jonkin verran. Pipe Flow mahdollistaa merkittävästi perinteisiä malleja täsmällisemmän simuloinnin, mutta sen tulosten verifiointi olisi tärkeä askel.

6.2 Työn kehittäminen

Tässä työssä saatujen alustavien tulosten perusteella työtä pystyisi kehittämään moneen eri suuntaan. Erilaisten aineominaisuuksien vaikutuksen testaaminen kaivokenttien toimintaan onnistuisi helposti. Jo aiemmin mainittu lämmönsiirtonesteen sisäänmenolämpötilan muuttaminen dynaamisesti veisi kaivon toiminnan lähemmäs todellisuutta. Kaivon lämmönsiirtoa voisi tarkastella täsmällisemmin vaikka vain yhden kaivon osalta selvittämällä, voiko pohjaveden luonnollista konvektiota mallintaa järkevästi. Myös pelkän Pipe Flow -moduulin tutkiminen voisi olla hedelmällistä, mikäli jostain kaivosta olisi saatavilla mittausdataa, koska kuten tässäkin työssä nähtiin, lämmönsiirtokertoimelle saatiin tulos, joka poikkesi merkittävästi muualla kirjallisuudessa esitetystä tuloksesta. Tässä työssä lämmönsiirto kaivosta U-putkeen laskettiin pelkkänä johtumisena. Pipe Flow'n avulla laskettujen tehojen ja esimerkiksi EED-ohjelmalla (Earth Energy Designer [36]) tietylle teholla laskettujen keskimääräisten lämpötilojen vertailu voisi olla myös yksi kiinnostava näkökulma.

Lasketuissa malleissa lämpökaivosta saatu teho käyttäytyi pitkällä aikavälillä aaltoilevasti. Tämän erikoisen tuloksen tarkempi analysoiminen olisi myös hyödyllistä. Aaltoilu voi johtua numeerisesta ratkaisusta, esimerkiksi laskentaverkon tiheydestä tai aika-askeleen pituudesta, mutta taustalla voi olla myös jokin fysikaalinen asia.

Tämän työn aikataulussa ei ehditty mallintaa pohjavesivirtausta Pipe Flow'n kanssa. Tällaisesta laskennasta voisi saada täsmällisemmän käsityksen erilaisten pohjavesitilanteiden vaikutuksesta lämpökaivoihin. Pohjavesivirtauksen simuloinnissakin tosin ongelmaksi saattaa tulla mittausdatan puuttuminen tulosten varmistamista varten. Samoin kaivon jäätyminen mahdollisuus olisi hyvä huomioida, mutta sekin vaatisi nesteen lämpötilan dynaamisen vaihtelun, jotta simulaatio vastaisi todellisuutta. Samalla tavalla olisi mahdollista huomioida kaivon käyttö jäähdytyksessä ja

sitä kautta tuoda mukaan kallioperän regeneraatio. Tämän työn kokeiluissa lämpötilat piti asettaa väkisin sellaisiksi, että jäätyminen jossain järjellisessä ajassa saatiin todennettua. Lämpötilariippuvien aineominaisuuksien lisääminen on kuitenkin helppoa.

LÄHTEET

- [1] RIL 265-2014, Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa, Tammerprint Oy, 2014, 189 s.
- [2] Tilastokeskus - Asumisen energiankulutus 2014. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/asen/2014/asen_2014_2015-11-20_tie_001_fi.html Luettu 1.5.2016.
- [3] SULPU ry - Viime vuonna asennetut 60000 lämpöpumppua lisäsivät lähes 1 TWh uusiutuvan energian käyttöä talojen lämmityksessä, 2016. Saatavilla: <http://www.sulpu.fi/-/viime-vuonna-asennetut-60-000-lampopumppua-lisasivat-lahes-1-twh-uusiutuvan-energian-kayttoa-talojen-lammityksessa> Luettu 1.5.2016.
- [4] St1 - Puhdasta lämpöenergiaa maan syvyyksistä, 2015. Saatavilla: <http://www.st1.fi/deepheat> Luettu 1.5.2016.
- [5] K. Kauppila, Lämpökaivoihin perustuvat suuret lämmitys-/jäähdytysjärjestelmät, Suomen kylmähdistys ry, julkaisu nro 71, Koulutuspäivät, 2012.
- [6] A. Huusko, Energiakaivokentän mitoituksen periaatteet, Suomen kylmähdistys ry, Koulutuspäivät, julkaisu nro 75, 2014.
- [7] J. Juvonen (toim.), Lämpökaivo - Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, Ympäristöopas, Suomen ympäristökeskus, 2009.
- [8] R. Perälä, Lämpöpumput, Tallinna, Alfamer Oy, 2009, 119 s.
- [9] A. Aittomäki (toim.), Kylmäteknikka, 4. painos, Porvoo, Bookwell, 2012, 413 s.
- [10] Geologian tutkimuskeskus - Mynämäen kaivon geoenergiatutkimukset 2010–2014, 2015. Saatavilla: http://www.kalliokaivo.fi/media/tiedostot/mynamaen-kaivon-geoenergiatutkimukset_kooste.pdf Luettu 6.5.2016.
- [11] J. Acuña, B. Palm, Local Conduction Heat Transfer in U-pipe Borehole Heat Exchangers, Proceedings of the COMSOL Conference, Milan, 2009.
- [12] X. Fang, Y. Xu, Z. Zhou, New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations, *Nuclear Engineering and Design* 241, 2011, pp. 897-902.

- [13] A.F. Mills, Basic Heat & Mass Transfer, 2nd ed., Prentice Hall, 1999, 1000 p.
- [14] K. Kauppila, Energiakaivokenttien mitoitus ja elinkaari, Suomen kylmähdistys ry, julkaisu nro 77, Koulutuspäivät, 2015.
- [15] J. Acuña, Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers (lisensiaattityö), KTH School of Industrial Engineering and Management, Tukholma, Ruotsi, 2010.
- [16] P. Mielke, D. Bauer, S. Homuth, A.E. Götz, I. Sass, Thermal effect of a borehole thermal energy store on the subsurface, *Geothermal Energy* 2 (5), 2014.
- [17] N. Diao, Q. Li, Z. Fang, Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, *International Journal of Thermal Sciences* 43, 2004, pp. 1203-1211.
- [18] D. Van Reeve, Modelling the performance of underground heat exchangers and storage systems (diplomityö), Chalmers University of Technology, Göteborg, Ruotsi, 2011.
- [19] D. Marcotte, P. Pasquier, On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test, *Renewable Energy* 33, 2008, pp. 2407-2415.
- [20] P. Oberdorfer, R. Hu, M. Rahman, E. Holzbecher, M. Sauter, O. Mercker, P. Pärish, Coupled Heat Transfer in Borehole Heat Exchangers and Long Time Predictions of Solar Rechargeable Geothermal Systems, Proceedings of the COMSOL Conference, Milan, 2012.
- [21] R. Rosén, A. Gabrielsson, J. Fallsvik, G. Hellström, G. Nilsson, System för värme och kyla ur mark - En nulägesbeskrivning, Statens Geotekniska Institut, Linköping, Ruotsi, 2001.
- [22] J. Puranen, Termodynamiikka ja virtaukset, TAMKin opintomoniste, Tampere, 2015.
- [23] W. Kays, M. Crawford, B. Weigand, Convective Heat and Mass Transfer, 4th ed., Singapore, McGraw-Hill, 2005, 546 p.
- [24] T. Kinnunen (toim.), Pohjavesitutkimusopas - käytännön ohjeita, Suomen vesiyhdistys, Vammala, 2005.

- [25] M. Thangarajan (toim.), Groundwater - Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management (e-kirja), Springer, 2007.
- [26] A. Liuzzo-Scorpo, B. Nordell, S. Gehlin, Influence of regional groundwater flow on ground temperature around heat extraction boreholes, *Geothermics* 56, 2015, pp. 119-127.
- [27] J. Busby, M. Lewis, H. Reeves, R. Lawley, Initial geological considerations before installing ground source heat pump systems, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 42 (3), 2009, pp. 295-306.
- [28] J. Bear, Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publishing Company Inc., New York, Yhdysvallat, 1972, 764 p.
- [29] A.C. Chiasson, S.J. Rees, J.D. Spitler, A Preliminary Assessment of the Effects of Ground-Water Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems. *ASHRAE Transactions* 106 (1), 2000, pp. 380-393.
- [30] V. Pasquale, M. Verdoya, P. Chiozzi, Darcy velocity and Péclet number analysis from underground thermal data, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 51 (4), 2010, pp. 361-371.
- [31] P. Eskilson, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes (väitöskirja), Department of Mathematical Physics, University of Lund, Ruotsi, 1987.
- [32] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method, 2nd ed., Pearson, 2007, 503 p.
- [33] T. Karvinen, COMSOL, sähköpostikeskustelu.
- [34] J. Acuña, Distributed thermal response tests - New insights on U-pipe and coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes (väitöskirja), KTH Industrial Engineering and Management, Tukholma, Ruotsi, 2013.
- [35] C. Li, J. Mao, Z. Xing, J. Zhou, Y. Li, Analysis of Geo-Temperature Restoration Performance under Intermittent Operation of Borehole Heat Exchanger Fields, *Sustainability* 35 (8), 2016.
- [36] Buildingphysics.com - EED - Earth Energy Designer. Saatavilla: <http://www.buildingphysics.com/index-filer/Page1099.htm> Luettu 21.5.2016.